

水利水电深部工程地质勘察技术现状与发展趋势

张世殊

(中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司, 四川 成都 610072)

摘要: 随着国家基础设施建设和能源资源开发的深入推进, 我国西部水利水电开发呈现出更深更大规模发展趋势, 受制于复杂的深部地质环境和有限的探测技术水平, 深部工程常遇高地应力、高地温和高渗透压等高能地质环境挑战, 给国家重大工程的规划和实施带来一系列挑战, 亟需发展适用于深部环境的勘探与测试技术。从深部工程超深定向钻探技术、深部工程物探技术、深部工程随掘与随钻探测技术、深部工程岩体原位试验与测试技术以及深部工程围岩分类与参数取值等方面, 全面梳理了国内外深部工程地质探测与测试研究进展和面临的问题, 探讨深部工程地质勘察技术未来的发展趋势和研究方向, 以期对深部地下工程建设和资源开发利用奠定基础。

关键词: 水利工程; 深部工程; 工程地质; 勘察技术; 定向钻探; 工程物探; 随掘与随钻探测; 原位测试

中图分类号: TV 221

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2025)06 - 1377 - 28

Research status and development trend of deep geological exploration techniques for hydraulic and hydropower engineering

ZHANG Shishu

(PowerChina Chengdu Engineering Corporation Limited, Chengdu, Sichuan 610072, China)

Abstract: With the advancement of national infrastructure construction and energy resource development strategies, hydraulic and hydropower development in Western China has exhibited a deeper and larger-scale trend. However, due to the complexities of deep geological environments and limitations in exploration techniques, deep engineering often faces challenges posed by high-energy geological conditions, such as elevated in-situ stress, high ground temperatures, and significant hydraulic pressures. Consequently, these factors present a series of challenges for the planning and implementation of major national projects, underscoring the necessity for the development of exploration and testing techniques tailored to deep conditions. This paper summarizes the current state of research on deep geological exploration and testing techniques, including ultra-deep directional drilling methods, deep geophysical exploration techniques, detection methods during tunneling or drilling, in-situ testing techniques, and the classification and parameter values of deep rock masses. It also identifies existing challenges within these areas. Furthermore, the paper discusses the development trends in deep geological exploration and testing techniques. The research findings will provide a foundation for deep engineering construction and the exploitation and utilization of deep resources.

Key words: hydraulic engineering; deep engineering; engineering geology; exploration technology; direction drilling; engineering geophysical exploration; detection while tunnelling or drilling; in-situ testing

收稿日期: 2024 - 11 - 28; **修回日期:** 2025 - 01 - 15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (U22A20601, U23B20145); 中国电建集团核心攻关项目 (DJ-HXGG - 2024 - 07)

Supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. U22A20601 and U23B20145) and Core Research Projects of PowerChina (Grant No. DJ-HXGG - 2024 - 07)

作者简介: 张世殊 (1970 -), 男, 1992 年毕业于中国地质大学 (武汉) 水文地质与工程地质专业, 现任正高级工程师, 主要从事水电工程地质方面的研究工作。E-mail: 1992070@chidi.com.cn

DOI: 10.3724/1000-6915.jrme.2024.0921

1 引言

开发深地资源与空间已成为未来我国科技发展的重要方向,实施国家水网、交通强国等多个标志性重大工程涉及国家基础设施建设和能源资源开发,特别是我国西部水利水电开发面临更深更大规模的地下工程建设。目前正在从地下数百米级向数千米级的更深部发展,如交通隧道最大埋深达到 2 000~3 000 m,水利水电工程隧洞和地下厂房埋深达 1 500~3 000 m,深部资源开采深度最大达 3 000 m。

不同于浅埋地下工程,受深部地质环境复杂性和探测技术水平的限制,深部地下工程常遇高地应力、高地温和高渗透压等高能地质环境,深部岩石力学理论、深地科学规律尚不明确,深部工程将面临一定程度的盲目性、低效性和不确定性^[1],如某重大水电工程,地下工程最大埋深达 2 000 m,面临的地应力超过 80 MPa、地温超过 70 °C、渗透压超过 7 MPa,给地下厂房、水工隧洞等工程建设带来了一系列挑战。随着国家战略工程的逐步实施,由于深部地质环境复杂,深部工程技术理论体系尚未建立,深部工程活动大大超前于基础理论研究,深地工程面临的深地环境特征、内部构造演变、致灾机制等仍处于“黑箱”或“灰箱”状态,因此迫切需要发展适用于深部环境的勘探与测试技术。

本文针对深部工程面临的高应力、高地温、高渗透压等高能赋存地质环境,厘清国内外深部工程地质勘察技术研究现状,从深部工程超深定向钻探技术、深部工程物探技术、深部工程随掘与随钻探测技术、深部工程岩体原位试验与测试技术、深部工程围岩分类与参数取值等方面,全面梳理了深部工程地质勘察技术研究进展和面临的问题,并探讨了未来的发展趋势和研究方向,以期为深部地下工程建设和资源开发利用奠定基础。

2 深部工程地质勘察定向钻探技术

定向钻探技术是利用钻孔自然弯曲规律或采用造斜工具,迫使钻孔轴线按设计轨迹产生一定弯曲延伸的技术。在高海拔、大埋深、深切割的极端环境下,深部工程勘察十分艰巨,钻探设备搬迁困难,竖向钻探难以实施,须采用定向钻探穿越深切

河谷和高海拔无人区,其中轨迹控制和连续取心是定向钻探技术的重中之重。与此同时,高温、高压等恶劣环境和复杂地层也是西部地区深部工程定向钻探必须面对的难题。

2.1 深部工程地质勘察定向钻探技术

超深勘察钻孔中,钻孔定向受钻具动力学复杂性、岩土可钻性差异和轨迹偏移风险的多重技术挑战,要实现钻孔轨迹精准地控制,需要解决钻探轨迹控制方法这一基础问题^[2]。

目前,钻孔轨迹控制技术作为定向钻的核心技术内容,主要经历了 4 个发展阶段。第 1 阶段:依赖特殊的工具或措施来实现轨迹定向控制,比如利用造斜器或者修改钻杆、钻头组合,但这种方式较为原始,不能实现复杂定向,功能简单,控制效果欠佳。第 2 阶段:主要通过涡轮和螺杆钻具,联合测斜仪等控制和监测钻孔轨迹。第 3 阶段:通过随钻测量器具及弯头动力钻具、弯外壳螺杆钻具等手段实现轨迹控制,钻孔轨迹控制精度有较大提高,基本达到了定向随钻轨迹控制的要求,这也是现阶段定向钻孔和丛式井等的轨迹主流控制技术。第 4 阶段:通过旋转导向钻孔系统等手段实现钻孔轨迹控制,相比前 3 个阶段,发展到第 4 阶段能够实现钻进过程中实时控制轨迹,具有精度高、时效强、质量高等优点,是未来定向轨迹控制的发展方向。目前,在定向钻孔轨迹控制方面,国外如美国斯伦贝谢、贝克休斯、哈里伯顿等公司相关产品代表了世界最高水平。然而,我国在定向轨迹控制方面起步较晚,从 20 世纪 80 年代开始起步,经过“十二五”规划期间的发展,已有较大进步,如中海油研发的“璇玑”旋转导向系统;中国石油研发的“CG STEER 旋转导向系统”,已在国内四川致密气开采、页岩油开采区域以及国外白俄罗斯列奇察油田等完成全井作业 300 余口;中石油工程院研发的“全旋转指向式导向系统”,在近 2 年内实现现场验证与实践,累计达到 35 口井。国内外旋转导向钻孔系统起源于油气行业,也因油气行业而不断发展^[3]。目前针对我国西部复杂地质环境(如高地应力、强涌水、坚硬致密弱研磨性地层等)下的深部工程勘察,尚未专门研制出较成熟的旋转导向钻孔系统,在实际应用中的可靠性和稳定性也有待验证。

目前较为常用的定向钻探轨迹控制分为单点轨迹控制和随钻轨迹控制。相比之下,单点定向轨迹控制精度不高。随钻轨迹控制主要采用有缆和无

缆随钻测量技术，定向钻进过程中通过实时观测钻孔轨迹的变化，及时调整造斜工具面方向和钻进参数，实现钻孔轨迹精准控制。由于钻孔直径大、泵量大($\geq 10\text{ L/s}$)、泵压高、设备重的限制，无缆随钻定向钻进方法难以适应复杂艰险山区的深部工程地质勘探；对于有缆随钻定向钻进，其具有小直径弯螺杆马达，能够实现精准定向、方位可控、连续造斜，由于钻进过程中泵量小可满足绳索取心，因而适用于小直径地质钻探和顶角较小(或倾角较大)的钻孔中^[4]。

针对大角度曲线定向孔绳索取心钻杆定向仪器随钻测量难题，定向仪器通过重力作用难以投放至孔底，如何将定向器具投送到位、固定、定向，并实现打捞回收，国内外目前尚无相关研究成果。对此，中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司联合中国地质科学院探矿工艺研究所等单位研发了一套大角度定向孔绳索钻杆定向钻进钻具组合与钻进工艺^[4]，其中钻具组合如下： $\phi 96\text{ mm}$ PDC(Polycrystalline Diamond Compact，聚晶金刚石复合片钻头)全面钻头- $\phi 73\text{ mm}$ 的弯螺杆-定向接头- $\phi 73\text{ mm}$ 的无磁钻杆(内置随钻随测设备)-变丝接头- $\phi 71\text{ mm}$ 的绳索钻杆- $\phi 89\text{ mm}$ 的主动钻杆-通缆水龙头(见图 1)。目前，通过该项技术的应用，在某重大水电工程中已成功实施了千米级大角度($2^\circ/10\text{ m}$)曲线定向钻进，轨迹如图 2 所示。

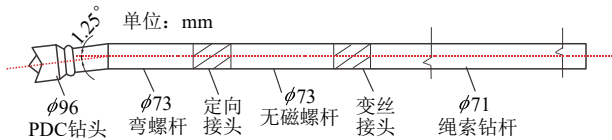


图 1 定向钻具组合
Fig.1 Directional drilling tool assembly

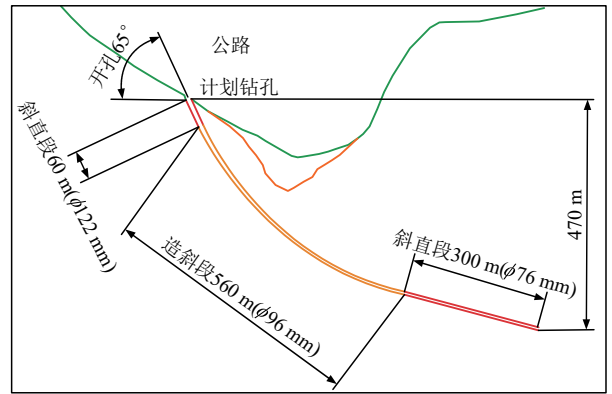


图 2 某重大水电工程曲线定向钻孔轨迹示意图
Fig.2 Schematic diagram of directional drilling trajectory of a curved borehole in a major hydropower project

2.2 深部工程定向钻探连续取心技术

水利水电工程地质勘察需要通过钻探取心来直观和准确地分析地质构造和地层情况。然而，超深钻孔取心的取心率一直是国内外地质工作的难题。例如，天山胜利公路隧道勘察完成 $2\,271\text{ m}$ 水平定向孔，采用提大钻的方式实现点状取心，完成 2 次取心，岩心长度仅 2.2 m ^[5]；粤港澳大湾区狮子洋主航道供水工程勘察也是采用提大钻方式实现取心钻进，不能实现绳索钻杆连续取心；某山区铁路定向钻进实现全孔连续取心，钻孔轨迹为直线状。对此，中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司开展了大量定向钻探连续取心研究工作，以某极端地质环境重大工程为例，为了查明长大深埋隧道地质构造情况，提出了大角度曲线定向与绳索取心同步技术，研发了高强度绳索取心钻杆、导向取心钻头、滑动稳定器与柔性导向取心钻具组合，该钻具由 $\phi 99\text{ mm}$ 导向取心钻头、 $\phi 99.5\text{ mm}$ 扩孔器、 $\phi 97\text{ mm}$ 滑动稳定器以及 $\phi 72\text{ mm}$ 高强度绳索取心钻具组成一套柔性导向取心钻具组合(见图 3)，既可以高强度造斜，又可以实现连续取心，突破了坚硬地层定向强造斜和绳索取心同步的技术瓶颈，国内外首次实现大角度曲线定向绳索连续取心钻进，完成 $1\,004\text{ m}$ 大角度曲线连续取心深钻孔(见图 2)，实现曲线段取心率 $>85\%$ (见图 4)。

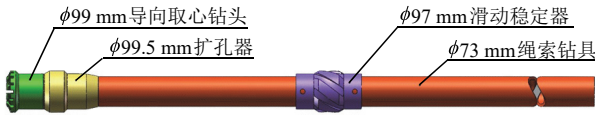


图 3 柔性导向绳索取心钻具
Fig.3 Flexible guide rope coring drilling tool



图 4 超深大角度曲线定向钻孔曲线段岩心
Fig.4 Ultra deep curve directional drilling curve section core

2.3 深部工程高能环境复杂地层钻探技术

深部工程勘察普遍面临高地应力、高水压、坚硬岩等复杂地质环境，钻孔过程中缩径、垮塌、漏失、涌水等不良地质情况时有发生，导致钻进困难，

严重影响钻进效率, 甚至钻孔报废。

2.3.1 高地应力环境钻探

当岩体赋存深度达到数千米时, 深埋条件下的岩体将承受巨大的上覆岩层的自身荷载、结构构造应力, 将会产生高~极高的地应力场, 给深部工程勘察带来一系列挑战, 郭昆明^[6]针对高地应力条件下煤层塌孔严重套管无法下入的难题, 提出了一种钻护一体化工艺技术, 设计了新型专用套管, 确定了其结构及相应参数, 进行了有限元分析, 并通过工业性试验, 验证了新型护孔钻进专用套管的整体稳定性, 满足施工要求。天地王坡煤矿 3316 工作面由于高地应力的影响, 钻孔钻进过程中垮塌、卡钻、喷孔等现象频发, 严重影响钻孔瓦斯抽采效果, 为解决此类问题, 徐耀鉴等^[7]设计了一种适用于高地应力地层的新型钻头, 这种钻头综合了弱包镶技术与交错式唇面设计两种先进方法, 很好地解决了高地应力地层钻进难进尺的问题, 交错式唇面钻头能够减少钻头与孔底的接触面积, 增加钻头唇面作用于岩体的单位面积压力, 从而提高钻头的锋利性, 新型钻头的时效和寿命分别比同规格普通钻头提高 42% 和 28%, 取得了良好的效果。然而, 在高地应力条件下, 由于地层应力的释放, 会造成孔壁上径向应力大于孔内液柱压力, 导致钻孔缩径, 解决钻进遇高地应力时钻孔缩径扭矩大的难题是下一步研究重点。

2.3.2 强涌水地层钻探

水利水电深部工程地质勘察钻探工艺主要以小口径金刚石绳索取心钻进为主, 钻孔口径级配较小, 当钻遇涌水层位时, 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, 同时强涌水还会导致孔壁垮塌、内管总成及打捞器无法到位等实际难题, 严重影响勘察任务实施。对此, 张春林^[8]提出了一种闭压式灌注水泥砂浆进行堵涌的方法, 即将注浆管下入到涌水层段顶部, 注浆管与孔口表层套管通过法兰盘进行密封连接, 形成孔内闭压注浆系统, 采用泥浆泵向孔内高压注入水泥砂浆, 水泥砂浆的注入量应保证其凝固后在涌水地层形成的水泥环强度大于涌水地层的水压, 有效解决了钻孔涌水问题。时志兴^[9]研究认为处理涌水事故一般用加重冲洗液钻进, 但加重冲洗液不适合绳索取心钻进, 采用水泥浆封堵是一种较为成熟的方法, 普通水泥浆遇流动的水会被冲散, 很难取得封堵效果。尽管针对涌水地层的封堵已有较为成熟的技术, 但对深部工程地质勘察而言, 遇高渗透压强涌水地层时,

现有封堵技术存在难以适用的问题, 亟需在超深钻孔孔内涌水阻隔器具和早强、速凝特种水泥封堵材料等深部强涌水地层处理手段方面开展进一步研究。

2.3.3 坚硬致密弱研磨性地层钻探

对深部地下工程而言, 遇坚硬致密、弱研磨性岩层的几率显著增加, 常规金刚石钻头在钻进过程中存在效率低下的问题。对此, 王佳亮和张绍和^[10]采用唇面酸洗方法、优化切削齿结构设计、孔底投砂方法、提高钻头金刚石品级等方法, 但依然不能有效地解决钻头打滑问题。

为了提高金刚石钻头在坚硬致密、弱研磨性地层的钻进效率, 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司研发了复合基孕镶金刚石钻头(见图 5)及配套钻进工艺, 采用预合金粉末配方体系和具有非破岩能力的硬质磨料, 提高胎体材料的摩擦因数和钻头唇面粗糙度, 可改善金刚石的出刃能力, 从而提高钻进效率。同时, 为解决常规绳索取心钻探工艺中钻杆及钻头底唇面较厚, 碎岩面积较大, 影响超硬地层钻进效率的问题, 通过减小克取岩石面积, 采用高转速、小钻压工艺, 并充分利用液动冲击器的冲击功, 提高钻头的碎岩效率, 可实现坚硬岩体快速钻进。

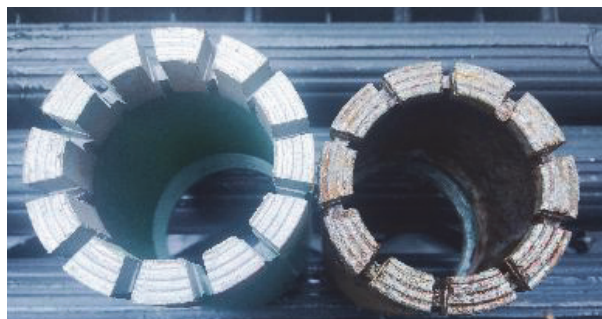


图 5 复合基孕镶金刚石钻头

Fig.5 Composite based impregnated diamond drill bit

2.4 深部工程定向钻探装备

多角度定向取心钻探装备多在煤炭、地矿、工程勘察中应用, 为了满足煤矿区超长工作面长距离高效区域瓦斯抽采、水害防治和隐蔽致灾因素探查的需求, 常采用模块化的设计思路。中煤科工集团研发了多种规格的水平定向钻机, 其中开发了具备超 3 000 m 钻进能力的 ZDY15000LD 大功率定向钻进装备, 在神东煤炭集团保德煤矿进行钻孔工程示范, 完成了主孔深度 3 353 m 的沿煤层超长贯通定向钻孔, 创造了我国井下定向钻进孔深的世界纪录^[1], 但其大多在地层单一、岩层较软的煤层中应用, 转

速较低, 且不取心。

在工程勘察定向取心钻机方面, 国内外大多钻机适用于 $45^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 的钻孔倾角, 国外安百拓研发生产了适用于地表和坑道作业的 Smart8 水平取心钻机, 具备 2 000 m 级水平钻进能力且工作角度为 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$, 但其扭矩小、动力小且成本高, Smart8 钻机在水电工程领域已完成深度达 1 282 m 的水平定向连续取心钻孔; 国内黄海机械公司研发生产了 HCR-8 型全液压钻机, 同样具备 2 000 m 级水平钻进能力且工作角度为 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$, 扭矩大、动力大, 该钻机在铁路工程领域已完成深度达 1 888.88 m 的水平定向连续取心钻孔。国内英格尔公司、诺克公司、西安探矿机械厂、无锡锡钻公司等公司生产的水平绳索取心钻机一般钻孔设计能力没有超过 1 000 m。

为实现重大水电工程深部工程地质勘察过程中深部地质信息的准确获取, 中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司牵头自主研发了 3 000 m 级长行程、大扭矩、全液压、智能化定向钻探装备 CDX-3000(见图 6), 设计了自动升降平台和变幅机构, 创新性地把钻塔、变幅机构及绞车集成在一个可升降的平台上, 解决了钻探装备水平钻进稳定性难题, 钻机质量减轻 1/3, 实现远程控制无极变速, 最大定向钻进深度 3 000 m, 填补了国内 3 000 m 级以上高转速绳索取心钻机的空白, 关键技术指标达到国际领先水平, 能够实现超千米级大角度曲线定向钻探取心, 解决高山峡谷地区深部工程地质勘察过程中地质信息获取难的问题, 极大地提高水电深部工程地质勘察的水平。



图6 CDX-3000 定向钻机

Fig.6 Directional drilling rig CDX-3000

3 深部工程地质勘察物探技术

3.1 深部工程地质勘察物探技术需求

深部交通、能源工程建设、矿产资源开发以及

深部实验室建设, 将面临高地应力、高地温、高渗压等复杂地质条件的挑战, 建设过程不可避免地出现突水突泥、塌方冒顶、软岩大变形和岩爆等工程灾害, 给深部资源开发和地下工程建设带来危害, 为避免认识局限, 需对深部地质环境进行地球物理探测。通过物探技术实现对地球深部结构的研究, 早已有之。1986 年, M. Blízkoský 等^[11]根据地球物理和地质资料, 研究了 Noho 的地势和大型正重力异常的分布。1991 年, S. V. Krylov 等^[12]通过冲击波和局部地震产生的纵波和横波的联合分析, 建立了贝加尔湖裂谷带地壳和上地幔模型的新特征。随着社会的发展, 大型工程的建设需求日益增长, 工程地质勘察在深度、精度、适用性等方面有更高需求。因此, 作为弥补认识局限的物探技术在未来有广阔的发展前景。

3.2 深部工程地质勘察地震波法探测技术

在众多地球物理勘探技术中, 地震波法勘探因其高效和准确性而在各种工程项目中得到广泛应用。其中, 反射波勘探和面波勘探作为 2 种主要的地震勘探技术, 都在不同的工程地质勘察应用场景中展现出优势和局限性。

3.2.1 深部工程反射波勘探

作为物探的重要方法之一, 反射波地震勘探最早在 20 世纪 30 年代石油和天然气行业中得到应用。到 20 世纪 80 年代初期, 得益于仪器精度和数字处理技术的快速发展, 该方法广泛应用于工程地质勘察。目前, 随着物探硬件设备、计算技术、人工智能和感知设备的不断进步, 物探感知能力和数据处理能力大幅提高。反射波地震勘探在超深埋设隧道、水利水电工程选址、煤矿区、跨海盾构隧道等工程地质勘查项目中取得了重要成果。如潘志伟^[13]通过小型震源发射-接收单元获取波动数据, 实现了高精度超深埋管线定位及成像, 克服了信号干扰和复杂地质条件下的探测难题。萨斯喀彻温大学地震实验室的 Z. Hajnal 等^[14]在阿萨巴斯卡盆地的铀矿勘探中采用地震波发射法, 除了解译出与矿化相关的断层系统的复杂区域分布外, 还通过对地震信号属性(幅度和频率)、光学电视和全波声波数据的扩展分析, 为勘探工作提供了蚀变带、黏土含量、孔隙度等详细的岩性特征信息。针对某秦岭隧洞所面临的大埋深、高应力、高水压、大流量的复杂地质条件, 李玉波^[15]引入三维地震波法进行了 2 次探索与尝试, 发现三维地震波法是该类隧洞 TBM 施工超前地质预报的高效手段之一。

综上, 反射波勘探技术在深部工程地质勘查中展现出显著的应用优势, 尤其在提高探测精度和应对复杂地质条件方面。但技术的局限性如高成本、数据处理复杂性及对环境的敏感性亦需在应用中予以重视。采用新的技术手段, 如用于地震波传感的分布式光纤声波传感系统(distributed acoustic sensing, DAS), 其使用光时域反射计(optical time domain reflectometer, OTDR)^[16]已被证明在地震波勘探中具有作用。杨旭^[17]针对我国岩溶隧道施工过程中常见的 TSP(tunnel seismic prediction)地震波法, 验证了其在岩溶隧道中的可行性和实用性, 并指出: 其整体预测效果较好, 局部精度不高, 必须结合其他地质方法才能提高局部地区的精度。未来, 应结合多种技术手段, 优化勘查效果、提高勘查精度以确保工程的安全与有效性。

3.2.2 深部工程面波勘探

面波勘探理论及方法的研究始于 20 世纪初, 随后多道面波分析技术(multichannel analysis of surface waves, MASW)等成果进一步推动了其在工程中的应用。在工程地质勘查中, 面波勘探技术可用于探测地下岩层分布、识别地下空洞和裂缝、确定地下水位和水质。

在深部工程地质勘查领域, 面波勘探技术正不断取得突破, 为地下结构的精确探测提供了多样化的技术手段。李永鑫^[18]利用 S 变换互相关法提取弱瑞雷面波频散曲线, 提升探测精度和抗噪能力。杨婷^[19]围绕青藏高原东缘区域的深部速度结构成像展开研究, 利用体波和面波 2 种观测资料的优势, 以及 2 种数据对结构互补的敏感性, 获取了研究区更高分辨率壳幔三维 P 波和 S 波速度结构。

然而, 尽管已有成果在提高勘探效率和精确性等方面取得了一定成效, 但在抗干扰、可靠性等方面仍具有挑战性。如混合源面波技术在高度城市化地区的噪声干扰问题; 微动勘探技术受环境影响的稳定性和可靠性问题。未来, 面波勘探技术的发展将继续在提高勘探精度、降低成本、提高效率 and 降低环境影响方面取得进展, 并依托计算技术和 AI 等先进科技, 有望实现勘探的自动化和智能化。

3.3 深部工程地质勘察电法探测技术

适用于深部工程地质勘察的电法类物探方法主要有大地电磁法和航空电磁法两类。近些年来, 随着国家基础设施建设迅猛发展, 大地电磁法和航空

电磁法在工程勘察上的应用也越来越多, 并取得了显著成绩, 尤其在长、大、深埋隧道的勘察中发挥了极为重要的作用。

3.3.1 大地电磁法

我国的大地电磁测深工作始于 20 世纪 60 年代初期, 经历了引进、探索、研究和发展阶段。随着张量阻抗分析方法的出现, 方法理论研究出现突飞猛进的进展。在仪器开发、观测数据收集、数据处理反演等方面都融入了现代高新技术, 使得大地电磁测深在应用领域有了很好的发展。

在仪器设备方面, 经历多年的发展, 现代大地电磁法除了适应高密度性、大面积性、海量数据采集的需要外, 还发展出卫星远程同步测量技术和网络型、分布式组合系统。目前国际上主流设备有加拿大 Phoenix 研制的 V8 等多功能大地电磁系统, 美国 EMI 与 Geometrics 联合开发的 EH-4 大地电磁系统, 德国 Metronix 开发研制的 MMS 系列大地电磁系统等。实践应用表明, 以上现代大地电磁测深设备在实际应用过程中取得了较好的效果。同时, 我国在引进消化吸收过程中, 国内大地电磁测深技术也有了长足的进步, 我国相关研发主体衍生出一系列国产大地电磁勘探设备, 如重庆国科 UltraEM Z4 大地电磁系统、湖南元石 F3 大地电磁仪等, 并开始逐步占有国内市场。

在方法发展方面, 基于大地电磁法低频信号弱、不易观测的问题, 衍生出了基于天然场源的音频大地电磁法(audio magnetotelluric method, AMT)和基于人工场源的可控源音频大地电磁法(controlled-source audio-frequency magnetotelluric, CSAMT)。由于远处雷电活动所引起的频率为 0.1~10 000 Hz 的天然场源是音频大地电磁法的场源^[20], 导致其在勘探深度上具有一定局限性, 适用于解决 3 km 以内的工程地质深部探测问题。相比较而言, 人工场源在激发强度和可靠性方面优于天然场源, 基于人工场源的可控源音频大地电磁法在具有更高效率的同时, 也减少了野外采集实测数据时所需要叠加的次数。

3.3.2 航空电磁法

航空电磁法相较于地面电磁法具有显著优势: 其发射与接收设备均集成于飞行平台, 无需地面人员复杂操作, 极大地提升了探测效率。该方法能够快速覆盖大面积区域, 尤其适用于地形复杂、难以通行的地区, 实现高效连续测量。经过多年技术发展, 航空电磁法已从单一频率探测发展为多频段探

测, 时间域与频率域技术日趋成熟。同时, 搭载平台也呈现多样化趋势, 直升机、固定翼飞机及无人机等多种载体不断优化, 推动了该技术的广泛应用与持续发展。现在市场代表性的航空电磁设备有: 时间域固定翼系统 MEGATEM II(CGG 公司)、频率域直升机吊舱系统 RESOLVE(CGG 公司)、时间域直升机吊舱系统 HeliGEOTEM、HeliTEM、SkyTEM(CGG 公司、SkyTEM Surveys 公司), 以及无人机航空电磁探测系统 GEM - 2A(Geophex 公司)。

尽管国内在航空电磁法方面的发展比国外缓慢, 但在电磁接收信噪比方面, 国内自主研发的设备已处于国际先进水平, 然而在数据采样率、灵敏度、稳定性等方面仍有待进一步提高。目前, 国内主流的航空电测设备有中国地质科学院研制的航空电磁系统 HDY - 402, 吉林大学仪器科学与电气工程学院和中国国土资源航空物探遥感中心联合研发的航空电磁系统 CHTEM。随着我国技术的不断进步, 近些年来我国航空电磁设备研发能力也得到快速发展, 如中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所研发的无人机航磁测量系统 CH - 3, 至今已有 200 km 试飞飞行数据; 测试深度可达 650 m 的固定翼时域航空电磁系统 IFTEM - II, 其噪声水平低于 2 nT/s, 并已在相关地区得到成功应用^[21]。

3.4 深部工程地质勘察测井技术

深部工程勘察测井通过对测量数据的处理和解释来推断地层或地质体的物理参数或方位信息, 能够实现地面常规地球物理方法难以获得的深度和空间分辨率。在水利水电工程地质勘察中, 测井技术专注于获取钻孔附近的岩性参数, 为地层评价提供直接数据, 有效预报深部区域的地质情况, 主要包括声波测井、井下电视和钻孔雷达等。

3.4.1 声波测井

声波测井技术是在钻孔中向地层介质发射并接收声波信号, 利用声波在不同介质中传播速度、衰减系数和反射系数等声学参数的差异, 对井壁附近的岩石物性参数进行分析, 确定岩土体的弹性模量、泊松比、强度等力学参数, 以及含水率、孔隙度等地层参数, 以此评估岩石和地层性质, 为岩土工程的设计和施工提供基础数据支持^[22]。随着电子技术的进步, 声波测井仪在声源和收发方式的设计方面受到了学者们关注。从最初的只能产生单一频率声波的单极子声源, 发展到了能够产生多种频率声波的多极子声源, 以更全面地了解地层的性质。最新的声波测井技术还包括相控阵声源与组合声源。相

控阵声源利用多个小声源的组合, 通过精确控制每个声源的发射时间, 可以形成聚焦或扩散的声波束, 实现对特定地层的精准探测。随着深部地下资源开发和地下工程的逐步发展, 超深随钻声波测井将处于高速发展阶段, 尤其是随钻钻孔地层纵、横波速度的测量。同时, 随钻声波测井远探技术对指导超深定向钻轨迹控制也有着重要意义。

3.4.2 井下电视

井下电视成像是基于光学成像, 将摄像头等光学传感设备安装在钻头或钻杆上, 随着钻进持续记录孔壁周围的图像, 以实时获取井下岩心或钻孔壁面的图像信息。

从 20 世纪 50 年代初开始, 国外就已开始在石油勘探领域研究井下电视, 并出现了利用摄像机获取井下图像的专利技术产品。由于产品技术水平有限以及应用场景环境复杂, 当时井下电视技术未能得到大力推广应用^[23]。到了 50 年代末, 随着摄影技术的发展, 井下检测中也开始应用该技术, 但也只能获取黑白静态图像, 传输帧率低, 仪器直径大, 适用场合有限, 工作持续时间短, 且对多数工程应用场景的环境要求高。到了 60 年代, 通过引进同轴电缆, 井下电视可以采集随钻过程中的影像, 但仍不具备实时观测和采集的能力。到了 80 年代, 井下电视得到了一定程度的发展, 可以应用于一些浅部低压、低温井中, 但图像传输依然不流畅、不实时, 且仪器外径较大, 工程适用性仍然较差^[24]。到了 90 年代末, “鹰眼”井下电视技术通过普通铠装测井电缆实现了图像的传输, 该技术不仅提高了井下电视传输性能, 还增加了测井深度, 且成本低廉、环境适应性强、负重能力也较强, 因此工程适用性高, 被普遍应用在全球石油测井领域^[25]。进入 21 世纪后, 国外在井下电视成像领域的研究也取得了长足进步。如 EVCAM 公司在 2016 年推出的全帧率井下电视, 不仅能大幅提高传输帧率, 还能获取彩色视频图像^[23]。目前, A. E. Mukhliss 等^[26]将新技术应用到井下电视测井中, 例如短波红外和 X 射线技术, 但受研制成本高、难度大等因素影响, 两项技术的应用仍未展开。

国内针对井下电视的研究起步相对较晚, 在 20 世纪 90 年代初期, 单秀兰首次介绍国外井下电视测井系统^[23]。到 90 年代末, 西安交通大学自主设计的井下电视系统利用测井电缆直接传输模拟信号, 探测深度突破了 1 000 m。进入 21 世纪后, 国内井下电视采用引进、改造与自主研制等多举措并举的

策略,井下电视研发利用开始发展起来。例如 2001 年,国外鹰眼电视测井仪开始应用于中原、胜利、大港等油田,该设备尽管在耐温耐压能力上有所提升,但存在传输效率低、图像失真等缺陷;2002 年,国内自主研发了一套测试深度可达 3 000 m 的井下电视测井系统,但在传输效率等方面存在一定缺陷。2017 年,西安石油大学研发出国内首套基于普通测井电缆的井下电视系统,可传输高清彩色视频,实现了 3 000 m 深度、30 MPa 高压、85 °C 高温下高帧率传输,具有低失真、高可靠性的特点^[27]。目前,国内常规测井仪器耐温多限于 150 °C~177 °C,不适用于超过 200 °C 的深井。为确保高温高压等恶劣条件下安全实时传输数据,需采用铠装测井电缆,虽效能略低于光纤,但普及度高且耐恶劣环境。在水利水电工程井下电视应用方面,向英^[28]通过结合井下电视成像技术与超声波测试确定岩石的完整性,有效评估了水利工程结构中基岩岩石的整体完整性,为设计和施工提供了可靠的参考。

综上,尽管我国在井下成像技术上有了长足的发展,但在设备尺寸、设备耐压、设备耐温、测试深度、图像质量及视频分辨率等方面和国外先进技术相比较,仍有不小的差距。为满足深地工程勘察需求,提升效率,研发适应高能环境、长距离井下成像系统及信号传输技术将是今后我国在深部工程地质勘察测井技术研究中的重要任务之一。

3.4.3 钻孔雷达

钻孔雷达基于高频电磁波在地下介质中的传播,其传播路径、场强与相位会因周围介质的电导率和介电常数,以及物体的几何形态的影响而变化。其中,介电常数影响电磁波的传播速度,电导率影响电磁波的衰减,常用于推断岩石或者地下目标的电参数,进而获取岩性或形态等参数。

钻孔雷达最大的特点是相对其他地球物理探测方式具有较高的空间分辨率,可以在保证高分辨率的前提下同时保证探测范围,能很好地解决探测距离和分辨率的矛盾^[29]。根据天线特性分为全向测量天线和定向测量天线。前者只能判断目标物体与井壁的距离和钻孔深度,无法进一步判断其方位角分布。后者则能够判断物体的方位角分布,但是需要定向性能良好的天线配合设备的转向,来主动寻找物体的具体分布方位。也可以利用多个全向天线组成阵列,通过解析不同电磁接收回波的相位差异信息,解算出物体的方位角分布。根据探测方式可分为单孔反射测量(见图 7)和跨孔测量(见图 8)。

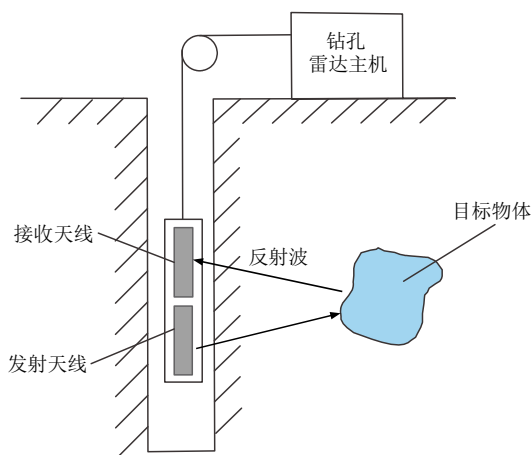


图 7 单孔反射测量示意图

Fig.7 Schematic diagram of single-hole reflection measurement

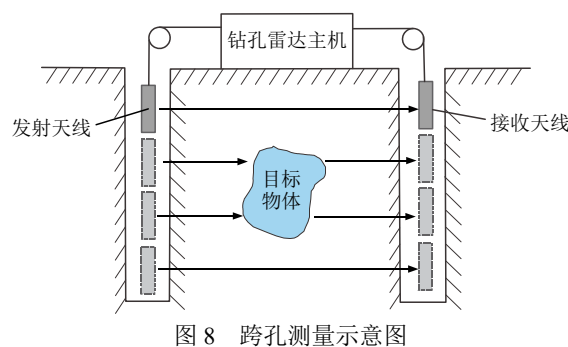


图 8 跨孔测量示意图

Fig.8 Schematic diagram of cross-hole measurement

单孔反射测量是钻孔雷达技术中常用的方法,具有操作简便、成本较低等优点,适用于地下结构勘探、岩溶探测、隧道和矿井的地质预报等领域。跨孔测量是将雷达天线放置在 2 个或多个钻孔中,通过测量不同钻孔之间的雷达波传播情况,获取更为全面的地下结构图像,适用于大型工程地质勘探、地下水资源评估、水利水电工程渗漏评价等领域。

4 深部工程地质勘察随掘与随钻探测技术

4.1 深部工程地质勘察随掘技术

由于深部隧洞工程通常表现出线路长、埋深大等特点,地形地质条件复杂以及地表勘察技术手段有限,在隧洞施工前期难以全面准确掌握隧洞穿越区地质情况,不少工程实践表明隧洞施工过程不可避免地遭遇断层破碎带、裂隙发育带、软弱地层、溶洞、暗河等不良地质情况^[30]。随着深长山岭和跨海隧洞等高难度隧洞工程的实施,对工程地质勘察提出了更高的要求,地质勘察工作越来越注重隧洞

施工过程中的超前地质探测工作。

4.1.1 深部工程主动源地震波法探测技术

深部工程随掘地震波法根据震源类型的不同主要分为主动源法和被动源法,其中主动源法是通过人工激发的地震波向掌子面前方岩体传播,当前方岩体遇到岩性界面、断层、岩溶等不良地质体时,将产生地震波反射。再结合波的反射时间、速度、信号强度、波的形状和传播方向等特征对地质体进行探测分析。主动源地震波法主要应用于钻爆法施工的深部地下隧道工程,经过多年的发展,已得到广泛应用,该方法具有基础理论成熟、受洞内干扰小、预报距离远等优点,已成为隧道超前地质预报的主要方法。目前主要有 TSP(tunnel seismic prediction)法、SAP(seismic ahead prospecting)法、TRT(true reflection tomography)法、HSP(horizontal seismic profiling)法、TST(tunnel seismic tomography)法、ISP(integrated seismic prediction)法^[31]等多种方法,上述方法采用炸药震源、人工锤击或机械震源,并将检波器安装于边墙或掌子面,现场实施便捷,实现了对隧道前方约 100 m 范围内的地质探测。主动源地震波法由于观测系统布设及震源的激发需要,对施作的空间具有一定要求,目前主要用于钻爆法施工。对于施工环境较为封闭的 TBM 隧道,尤其是双护盾 TBM 施工环境,传统的震源激发方式难以适用。对此,姚林林等^[32]提出了采用新型震源激发和检波器安装方式的 GTRT 物探测试方法,便于双护盾 TBM 施工时在伸缩盾拉开一定程度的情况下对岩壁进行锤击,实现了该环境下的 TRT 震源激发。

4.1.2 深部工程随掘地震波法探测技术

高机械化施工隧道因其空间狭小且干扰源复杂,主动源地震波法很难取得理想的探测结果,因此主要采用被动源地震波法。被动源地震波法以施工机械进行作业时产生的振动信号作为地震波激发震源,如 TBM 及凿岩台车掘进破岩时产生的振动信号。为了利用隧道中的被动震源,不同学者使用地震干涉测量法将隧道中的这些恒定噪声转换为有效的类似主动震源数据的地震剖面,实现了在不干扰施工的状态下对前方地质条件做出判断。L. Petronio 和 F. Poletto^[33]首先提出了用于隧道地质预报的地震干涉法,在 TBM 施工隧道内和隧道外部署了多台三分量检波器,并在此基础上提出了隧道随钻地震探测(tunnel seismic while drilling, TSWD)方法。

E. A. Nilot 等^[34]进一步改进了 TSWD 方法,不需要在掘进机刀盘上部署任何检波器,所有的检波器都布设在随后安装的管片混凝土隧道衬砌上。以 TBM 掘进破岩信号作为震源,通过干涉处理,并提取反射波信号,然后根据提取的面波的速度反演估计界面在空间中的位置。

同时,基于被动源地震波法的机载探测 HSP 方法也得到深入研究,通过将被动源地震波法探测设备搭载于 TBM 或盾构,对采集的数据进行实时处理及成像解释,实现对隧道前方不良地质体的实时探测,目前该方法已在多个 TBM 及盾构施工隧道中得到了实际应用,并取得了较好的探测结果。李术才等^[35]针对凿岩台车施工隧道,通过采集凿岩台车钻臂上搭载的先导传感器信号,并在边墙采集随钻地震波信号,对 2 类信息进行等效脉冲地震采集和重构,提取出有效信号并形成可视化信息,可实现随掘施工条件下对掌子面前方断层、岩溶等不良地质体的探测。

地震波法作为在深部工程中应用最早、最广的地球物理方法,目前已经取得了较大发展,但还存在一些关键问题亟待突破,如探测多解性、多源融合性、定量探测等。因此未来的主要发展方向将针对上述问题进行深入研究,实现对不良地质体的精准快速探测。此外,目前地震波主要针对具有显著差异的异常地质体进行探测,例如断层带、软弱夹层、溶洞等不良地质体,但对于含水体的探测仍存在较大难度,因此利用地震波传播特性识别水体也将是未来的研究热点。

4.1.3 深部工程随掘电(磁)法探测技术

在水利水电工程领域,基于隧洞 TBM 施工过程中的随掘电法探测是近年研究热点。A. Kaus 和 W. Boening^[36]将探测电极安装在 TBM 刀盘或滚刀上,屏蔽电极安装在 TBM 护盾上,让探测电极与屏蔽电极通同性电流,使从屏蔽电极流出的屏蔽电流挤压从探测电极流出的探测电流,实现前方不良地质体的探测。李术才等^[37]利用电阻率法和激发极化法进行隧道前方的含水构造探测,通过获取视电阻率和衰减时间等信息反演地层电阻率和孔隙结构,进而实现目标体成像、定位及静态水量估算。针对掌子面前方目标体的精确定位问题,提出了一种基于参考模型约束的聚类反演方法,以提高反演结果的准确性。

4.1.4 基于 TBM 随掘参数的围岩分类

TBM 因其高效的施工效率、优质的施工质量、较高的安全性和环保性,在深埋地下工程的建设中得到了广泛应用。然而,TBM 对工程地质条件的敏感性较高,复杂地质条件下施工时若不及时根据工况调整作业参数,可能造成岩爆、挤压变形的发生,进而造成设备损坏并影响施工进度。围岩质量是反映 TBM 开挖面周围工程地质条件的重要指标。但受限于作业空间,传统的围岩分类方法在 TBM 掘进过程中难以快速获取相应参数。

TBM 围岩分类则侧重对围岩的可挖掘性、TBM 潜在卡机可能性、脱困难易程度等施工适宜性水平进行评价,考虑围岩主要地质因素与 TBM 工作效率之间的关联。然而以评估围岩稳定性为主的传统围岩分类方法在 TBM 施工过程中存在显著局限性,如 Q 法、RMR 法、BQ 法等涉及的围岩结构发育特征指标实时调查与识别存在一定障碍,难以指导 TBM 实时调整作业参数,影响施工效率。

因此,利用 TBM 掘进参数进行围岩分类并将分类结果反馈到后续作业参数模拟及预测中是目前常用的研究策略。TBM 掘进过程中,传感器会监测超过 100 个运行参数。为筛选出合适的 TBM 围岩分类参数指标,研究者通过分析这些参数与围岩质量或可掘性之间的关系,最终选取相关性较强的指标作为围岩类别划分依据^[38]。用于判别 TBM 施工围岩类别的参数指标,主要分为围岩状态相关参数指标和 TBM 掘进状态相关参数指标。随着光声电磁探测技术的发展,相关参数指标的获取方式在 TBM 施工中变得丰富多样。TBM 可分为刀盘系统、盾构系统、支撑系统、推进系统以及辅助系统,TBM 掘进状态相关参数指标则与这些系统相关。表 1 统计了部分与 TBM 刀盘、护盾系统以及支撑、推进系统相关的围岩分类参数指标。

在深部工程中,TBM 施工时基于掘进参数的围岩分类方法已经得到广泛应用,但在复杂地质条件

下,提高其准确性和适应性仍然是一个挑战,需要引入包括岩石强度与完整性、地质构造与断层以及水文地质条件在内的更多地质因素进行综合分析。如李青松等^[44]在 TBM 掘进参数基础上引入岩石强度的地质因素,经过多元逐步回归得到了回归方程,并将其应用在各围岩类别的地质分值上进行验证,发现得到的预测分值与现场地质分值吻合率较高。

4.2 深部工程地质勘察随钻技术

随钻量测技术(measurement while drilling, MWD)为水利水电深部工程地质勘察提供了新的思路,MWD 通过量测钻进的扭矩、压力、振动、转速、温度、倾角等信息,识别岩层结构、岩性变化,软弱破碎带和岩体力学特性等。

4.2.1 随钻测试系统

随钻测试系统的研发最早出现在油气钻探中,常规测井在大斜度钻孔中使用时,容易出现塌孔,导致测试参数失真,因此希望钻头实现随钻测井。整体来说,随钻测试系统主要包括钻进装置,以及数据采集、传输、存储与分析装置。随着电子技术的进步,随钻测试系统在近 40 年来得到了快速发展,并逐渐在岩土工程领域发挥重要作用。

加拿大公司 Soletanche-Bachy 在 20 世纪 80 年代研发了 Enpasol 系统^[45],将电磁转速传感器、力传感器、位移传感器安装在 Hutte200/2TF 液压伺服回转钻机机上对钻进参数进行量测。近年来,室内钻进平台和综合钻孔测试为随钻测试系统的研发提供了指导。王 琦等^[46]开发了现场围岩参数测试系统,该系统通过液压子系统、导向钻进子系统、监测控制子系统和测试辅助子系统这 4 个关键结构,对围岩岩体进行现场测试。S. J. Li 等^[47]在 DPM 的基础上融合钻孔电视测试,对深部岩体结构和力学特性进行了有效评价,并应用于锦屏深部地下实验室隧洞工程。

表 1 TBM 掘进状态相关参数指标
Table 1 Related indicators of condition of TBM excavation

参考来源	刀盘、盾构系统	支撑、推进系统
Q. Liu 等 ^[39]	刀盘面法向力、刀盘面滚动力、刀盘转速	推进速度
J. J. Ma 等 ^[38]	刀盘扭矩、刀盘转速	推力、推进速度、撑靴俯仰角和撑靴滚动角
D. Qiu 等 ^[40]	刀盘直径、滚刀数量、刀盘额定扭矩、刀盘卡滞脱扣力矩、刀盘每圈贯入深度	推力、撑靴有效支撑力
Z. Wu 等 ^[41]	刀盘扭矩、刀盘转速、刀盘功率、盾构压力	推进速度、撑靴压力、撑靴泵压力、控制泵压力
Q. Zhang 等 ^[42]	刀盘扭矩、刀盘转速	推力、推进速度
朱梦琦等 ^[43]	刀盘转速	推进速度、控制泵压力、撑靴压力、撑靴泵压力、撑靴俯仰角、撑靴滚动角

4.2.2 钻进参数分析

近年来,学者们利用钻进的扭矩、压力、转速、钻进速度等静力参数,通过对钻头切削破裂的过程进行理论分析,提出了多种计算指标来评价岩石可钻性。R. Teale^[48]通过破碎比和强度关系研究了岩石钻孔破岩比功值与岩石单轴强度的关联性。H. Karasawa 等^[49]提出有效轴力能和有效旋转能的概念,可以评估岩石强度及可钻性。

在岩石强度参数识别方面, M. M. He 等^[50]通过理论分析,建立了钻孔岩石强度和钻头参数间的关系。X. F. Wang 等^[51]提出了精细化随钻参数响应特征时间序列分析方法,分析了荷载参数与运行参数内在力学关系,建立了以动力修正钻进速度为变量的岩体强度定量表征模型。H. K. Gao 等^[52]基于能量守恒定律,建立了岩石切削能密度与随钻参数的关系式,构建了岩体等效强度随钻反演模型(ES-DP 模型),验证了 ES-DP 模型对岩体等效强度测试的有效性。在此基础上,建立了岩体裂隙参数随钻识别模型,并发现该模型测试精度较高。

目前利用钻进参数进行岩体性状的分析研究主要呈现以下趋势和需求:(1) 钻进参数的分析主要集中于利用扭矩、压力、转速等参数反演岩石力学参数,但是对分析岩体结构的帮助较少,难以将岩石力学参数转化为工程中更为关注的岩体力学参数。(2) 研究大多局限于回转钻参数,对于冲击钻参数的分析较少。一方面是因为冲击钻参数跳动大,难以分析,另一方面冲击钻随钻采集系统难以长期稳定工作。(3) 相比于单轴抗压强度的反演,内摩擦角和黏聚力的识别精度较低,这与钻进的参数敏感性有关。(4) 由于目前暂时没有一种普适性的随钻参数采集装备,导致各类分析方法虽然在定性分析上趋势相似,但岩石参数定量分析模型却各有千秋。(5) 对随钻测试系统而言,在钻进过程中有效区分不同岩体结构和岩性变化所引起的钻进参数变化较为关键。目前,可通过建立理论模型与经验公式、派生参数、多参数综合分析以及引入智能算法与机器学习等手段以准确识别岩体结构和岩性。然而,由于岩体复杂性、传感器精度与可靠性、数据解译方法以及工程实践中的局限性等因素的影响,仍存在误判或难以准确识别的情况。因此,未来需要进一步采取优化设备性能、加强数据解释能力以及引入多智能算法等措施来提高识别准确性。

4.2.3 钻进振动分析

钻进振动(或破岩地震波)信息为识别岩体结构提供了新的思路,由于不同岩体结构在波速上的差异,钻进过程产生的振动在振幅、波形和频率上存在显著变化,因此钻进的振动信息相比于扭矩、压力等钻参数对于岩体结构更为敏感,丰富的波形和到时信息为岩体结构的识别提供了依据。P. Flegner 等^[53]分析了回转钻机的振动,发现回转钻机的振动在频率和振幅上与岩性存在关系。J. Rostami 等^[54]通过测试室内钻进平台上的振动响应数据,发现振动信号不仅可用于岩性识别,对岩体孔洞同样具有一定识别效果。S. Kahraman 等^[55]研究表明,钻机压力、扭矩、振动等钻机参数均可用于岩性识别,但在空洞及软弱结构面的识别中振动信号的优势更为显著。

随钻地震波地球物理勘探(seismic while drilling, SWD)从一个完全不同的视角审视钻进振动信号,SWD 技术利用钻头破碎岩石的振动作为震源,以地球物理勘探信号处理方法为主要研究手段,探测钻孔周围和钻头前方的地质结构,目前多用于在油气勘探钻孔。由于缺乏高信噪比的采集装备和有效的反演方法,SWD 在深部工程的岩体结构识别方面暂时缺少实质性的突破。

冲击钻的信号不同于回转钻进的破岩信号,如果可以解决起震时刻的估算,将其看作主动地震勘探信号的思路是可行的,可以进行初至层析成像和波形反演等研究。未来的研究需要挖掘信号中的波场成分和波形信息,这是对岩体结构精细化解析和成像的重要发展路径。

5 深部工程岩体特性原位试验与测试技术

5.1 岩体力学参数原位试验技术

5.1.1 岩体变形试验

岩体变形参数是反映岩体变形能力和能量集中特性的基本参数,该量值的准确测量对于工程设计的合理性至关重要。自 20 世纪中期以来,越来越多的学者开始探索岩体变形原位试验的方法^[56]。目前,国内外众多学者提出的多种测试手段主要包括承压板法、钻孔变形法、隧洞液压枕径向加压法、声波法等(见表 2),并将其成功运用于多个隧道、边坡、深埋硐室、矿山巷道等工程当中。

然而,尽管当下已建立了多种岩体变形原位测试方法并构建了岩体弹性模量、变形模量、波速等

表 2 主要岩体变形原位试验方法特征信息表
Table 2 Characteristic information table of in-situ testing methods for deformation of main rockmass

试验方法	试验特征	试验优点	适用岩体
承压板法	通过承压板对半无限空间岩体表面施加压力并量测各级压力下岩体变形获得岩体变形参数	简便且直观	完整及较完整岩体
钻孔变形法	通过对孔壁施加径向水压力并测得各级压力下钻孔径向变形获得岩体变形参数	岩体扰动较小, 可在地下水位以下进行, 并可同时测量多个不同方向的变形情况	完整及较完整岩体
隧洞液压力径向加压法	利用液压枕对隧洞径向方向施加压力获得岩体变形参数	适用范围广, 岩体具有自稳能力即可满足试验条件	具有自稳能力的岩体
声波法	利用声波在岩体中的传播特性来评估岩体变形及完整性特征	岩体扰动较小, 测试过程快速准确	完整及较完整岩体

参数间转换的相关经验公式, 但当前的原位测试方法仍主要针对完整或较完整岩体。对于碎裂岩体而言, 其碎裂结构一方面导致围岩强度显著降低, 大大增加了原位测试的试验难度, 另一方面使得围岩力学性能出现空间差异性, 测试数据离散性较大, 对工程设计指导意义不强。此外, 裂隙岩体的尺寸效应和各向异性等特征同样不容忽视, 这些特征给岩体变形原位试验带来了巨大的挑战。

5.1.2 岩体结构面原位剪切试验

工程岩体的稳定性由岩石块体的强度与块体间结构面的强度控制, 尤其是岩体中软弱结构面的抗剪性质。岩体结构面强度特征的测试方法以原位直剪试验方法为主。该方法首先通过人工现场切割选定区域岩体并浇筑混凝土上部保护壳, 然后对试件分别施加不同垂直荷载后施加剪切荷载直至剪断, 并同步测读垂直和水平方向上的压力及变形结果, 从而获得岩体结构面的抗剪性能^[57]。

通过现场原位结构面测试试验, 获取岩体结构面剪切特征, 对保障道路、矿山等工程的边坡安全具有积极意义。但是, 现场原位结构面剪切试验往往需要较长的测试周期与较高的测试费用, 且难以获取类似室内直剪试验的高精度结果。结构面是否平直、岩块间的泥质软弱夹层、结构面强度的不均一性及结构面力学、变形性质的各向异性等, 仍是制约岩体结构面原位剪切试验发展的关键因素。

5.1.3 岩体强度现场试验与测试技术

岩体强度对于围岩的稳定性、地下工程开挖机械的性能以及岩爆等灾害发生的可能性具有极其重要的影响。目前已经提出了各种方法来测试岩体强

度, 如点载荷测试、压痕测试技术、钻孔触探法等。

(1) 点载荷试验: 一种用于快速评估岩石强度的简易试验方法, 其核心是通过对岩石试样施加集中点载荷直至破坏, 间接测定岩石的抗拉和抗压强度。国际岩石力学学会(ISRM)于 1985 年公布了用于测定岩石点载荷强度的推荐方法^[58]。

(2) 压痕测试技术: 最初主要用于评估小尺度材料和薄膜的硬度及弹性模量, 但随着技术的发展, 其应用范围已扩展至广泛的材料力学性能评估, 能进一步了解材料的其他基本力学特性。W. Q. Xie 等^[59]对从隧道掘进机(TBM)开挖过程中收集的块状碎片进行了单轴压缩试验、压痕测试以及点载荷测试, 以探究压痕指数与修正点载荷强度及单轴抗压强度之间的相关性。

(3) 钻孔触探法: 通过在钻孔中使用专门的探头(探针), 对孔内岩体进行原位测试, 测量其力学响应参数, 通过记录探针压裂岩体时的临界强度, 换算测试点位的单轴抗压强度, 从而评价岩体的工程特性。

钻孔触探法与实验室测试相比, 具有以下优点: (1) 测定结果更接近实际岩体; (2) 能够测量井下无法取样的软弱破碎岩体强度; (3) 能够测量不同深度和层位的岩体强度及其分布; (4) 测量过程简单, 能够实现快速测量; (5) 相较于现场原位大尺寸压剪试验, 经济性更强。因此, 钻孔触探法被认为是一种适合围岩强度测量的方法。对于深部水利工程的围岩测试, 钻孔触探法存在以下研究需求: (1) 探针对岩石的作用形式及其破坏机制; (2) 水、地应力、软弱面等因素对围岩强度测试结果的影响; (3) 需要将伺服油压系统置于孔中, 以适用于位移量的准确量测和深孔探测; (4) 测试过程中液压系统临界油压力值与岩体强度参数之间的关系如何建立。

5.2 岩体地应力测试技术

地应力是在成岩过程中经受建造和构造变形阶段后形成的蓄存在岩体内部的原生应力状态。岩石内部一点的应力状态由 3 个正应力和 6 个剪应力共 9 个应力分量来表示, 这 9 个分量定义了该点的应力张量, 9 个分量中有独立的 6 个分量。岩石内存在的应力是导致岩体材料与其他材料性质不同的最基本的力学性质之一, 是影响地下工程安全和稳定的关键因素。

为了确定工程岩体赋存的应力环境, 进行岩土工程的开挖设计需要进行地应力测试。与其他物理

量不同(位移, 温度等), 应力的“真值”不是一种可以直接测量的参数, 而只能通过测量有限岩石区域内应力变化时引起的如位移、应变或电阻、电感、波速等可测物理量的变化值, 并基于某种假设反算出该区域的平均应力值, 称为地应力估算。

国际上首次进行地应力测试是在 1932 年, 地点是美国胡佛水坝的坝底泄水隧洞中, 我国 1962~1964 年首次在三峡平善坝坝址通过表面应力解除法测试地应力。之后, 地应力测量迅速发展, 出现了各种测量元件和测量方法。至今, 在国内外, 地应力测试已发展出 30 余种测试方法, 各种方法结合各自不同的适用环境, 都有适当的假设, 表 3 列举了一些比较常用的地应力测试方法。典型的方法有国际 ISRM 颁布的“岩体应力测量的建议方法”, 其中肯定了以下 4 种测量方法, 并将其作为建议方法推广, 包括基于浅孔测量的美国矿业局(United States Bureau of Mines, USBM)孔径变形法, 南非科学与工业研究委员会(Council for Scientific and Industrial Research, CSIR)型钻孔孔壁应变测量法, 基于深孔测量的水压致裂法, 以及基于岩体表面应力测试的表面应力恢复法。

表 3 常用岩体地应力测试方法
Table 3 Commonly used in-situ stress estimate method

方法类别	测试方法
基于钻孔的方法	传统水压致裂
	原生裂缝水压致裂法
	钻孔孔壁应变法
	钻孔孔径变形法
	钻孔孔底应变法
	局部应力解除法
基于岩心的方法	钻孔崩落法
	非弹性应变恢复法
	差应变曲线分析法
	岩心直径变形分析法
	岩心饼化法
基于岩石表面应力测试的方法	声发射法
	表面应力解除法
	表面应力恢复法
	扁千斤顶法
其他方法	震源机制分析法
	断层滑移法
	地球物理测井分析法
	反演分析法

5.2.1 水压致裂法

水压致裂法可以利用地质勘探孔测量, 是工程早期勘察设计阶段最直接有效的地应力测试方法。

如图 9 所示, 在钻孔试验部位通过上下 2 个可膨胀的橡胶阻隔器实现密封, 然后泵入液体对该段钻孔施压直至压裂, 由压裂参数计算地应力^[60]。传统的水压致裂法(hydraulic fracturing, HF)建立在弹性理论基础上, 假设岩体是均质弹性、各向同性、密闭不透水的完整岩体, 并假设井眼的轴线方向平行于某一主应力方向, 理论上应该在垂直孔中进行测量, 只能确定垂直于钻孔轴线平面内的最大和最小主应力的量值, 再借助印模器、钻孔电视等辅助手段, 通过观察钻孔孔壁上裂纹的迹线方向来确定主应力的方向。

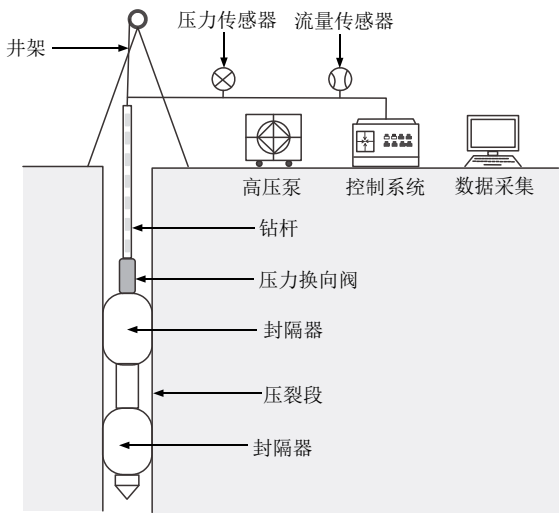


图 9 水压致裂法地应力测试
Fig.9 Hydraulic fracturing stress test

HF 法要求在一段完整岩石中诱发新的裂缝, 因此很难在高应力区域成功应用。F. H. Cornet 和 B. Valette^[61]提出了含裂缝水压致裂法(hydraulic testing of pre-existing fractures, HTPF)的理论基础, 将井壁中发现的已有裂缝重新打开, 从而确定裂缝平面上的法向应力。与 HF 法相比, 该方法具有地质特征限制少的优点, 不需要测定岩石的抗拉强度, 并且与孔隙压力效应无关, 只要岩体现有的裂缝走向和倾角存在变化, 无论是层理、节理面等薄弱面还是岩心饼化都不会对成功测量造成问题。但是, HTPF 法需要井下设备准确定位每个待测试裂缝的位置, 这要求深度校准具有良好的精度, 并且在完成现场所有测试、评估和处理数据之前, 无法获得应力估算初步结果。

水压致裂法测试设备目前已经逐渐成熟, 应用非常广泛, 其最大的优点在于简单易行, 测量深度大, 适应性强。在深钻孔地应力测试中, 水压致裂法是目前唯一的直接测试手段, 并且随着耐高压高温水压致裂装备的研发, 测试深度在不断增加, 在

工程应用领域的最大测量深度已达 5 105 m, 在大陆科学钻探计划中, 水压致裂法地应力测量的深度达到了 9 066 m^[62], 我国水压致裂地应力测量深度也已突破 2 000 m 大关。

5.2.2 钻孔套芯应力解除法

套芯钻孔应力解除法建立在弹性理论基础上, 测量时根据被钻进切割岩心的弹性应变或变形恢复来计算地应力。针对测试的目标和部位, 常用钻孔套芯应力解除法包括孔壁应变法、孔径变形法和孔底应变法三类。

钻孔孔壁应变测量法国外常用的测量元件包括南非 Council for Scientific and Industrial Research (CSIR) 和瑞典 Swedish Energy Agency 分别研发的三向孔壁应变计等。目前应用较广的仪器有澳大利亚 Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) 的 CSIRO HI 型空心包体应变计, 国内应用较广的仪器有长江科学院的空心包体三向应变计、中国科学院地质与地球物理研究所研究的 KX 系列空心包体三向应变计, 以及中国科学院武汉岩土力学研究所李邵军和郑民总^[63]研发的光纤光栅复合结构空心包体应变计等。

钻孔孔径变形法采用孔径变形计测量先导孔直径的变化, 已经商用的测量仪器有 USBM 钻孔变形计(美国矿务局), YJ-81 型压磁式变形计(中国科学院地质与地球物理研究所)、36-2 型钢环式变形计(中国科学院武汉岩土力学研究所)等。南非 Leeman 开发的 CSIR 门塞式孔底应变计和日本 Sugawara 研制的半球形 CCBO 孔底应变计适用于钻孔孔底应变测量, 目前, 这类测量元件及测试方法在国内应用范围较小, 原因在于其对钻孔的要求较高。

常规钻孔套芯应力解除法地应力测量设备的数据线需逐根穿过钻杆水孔, 测量时与钻进工作相互干扰, 因此适用于浅孔, 对深孔高温环境下测量受限。为了适应深孔地应力场的测试, 瑞典 Swedish Energy Agency 在 20 世纪 80 年代初成功开发了适用于水位以下的钻孔三向变形计, 实现了 510 m 钻孔地应力测试^[64]。王益腾^[65]研发了井下安装、回收绳索打捞式超前钻具和触头式显微光学孔径变形测量系统, 实现了在深孔中对应力解除前后钻孔形态及孔径变形的快速测试, 测试深度达到 637 m。葛修润和侯明勋^[66]研发了基于钻孔局部壁面应力解除法(borehole wall stress relief method, BWSRM)的地应力测井机器人, 不受测量深度限制, 避免了套钻取芯时可能出现的岩心断裂问题。

5.2.3 基于岩心的深钻孔地应力测试方法

近年来, 随着国家深地工程的实施, 在水电、交通、能源、矿山等各个行业都涌现出一批埋深超过 1 000 m 的深部工程。在深钻孔中采用直接法测量地应力时, 尽管能够获取较为可靠的试验成果, 但其成本较高且实施难度随钻孔深度增加而加大。相比之下, 岩心法地应力测试凭借其成本低、效率高、耐高温等条件的适应性, 在国内外多个超深高温钻孔中得到了广泛应用。目前应用较多的有以下几种:

(1) 声发射法(acoustic emission method, AE)

岩石在首次加载过程中会产生微破裂和声发射信号, 卸载后再次加载时, 只有当应力超过前次加载的最大应力时, 才会重新产生显著的声发射活动, 这种现象称为 Kaiser 效应。AE 法是根据岩石 Kaiser 效应, 对从原始地层中沿不同轴线获取的岩心进行单轴压缩试验, 获取试样 Kaiser 效应点, 进而计算岩心所处位置的地应力值。限制该方法测试精度最重要的因素是对 Kaiser 效应点的识别, 采用 AE 特征参数识别 Kaiser 效应点的方法较多, 一般是通过振铃计数累计或振铃计数与时间或应力的关系曲线, 识别出曲线上岩石扩容点之前跳跃式的激增点作为 Kaiser 效应点。AE 法尽管测试简单, 但测试记录的是该部位岩石所受最大历史荷载, 在漫长的地质演化过程中, 人们并不能确定测试结果代表现今该部位的真实地应力场。目前, 该方法只能作为一种辅助的地应力测试手段, 要更精确地估算地应力, 还需要对 Kaiser 效应的机制做进一步研究。

(2) 差应变分析法地应力测量(differential strain analysis method, DSA)

岩体在地应力的作用下处于压缩状态, 其本身含有的裂隙也会闭合, 当其从地下深处被取出后, 各方向的微裂隙张开。DSA 法是通过监测岩心在重新加载过程中, 由于微裂隙闭合所发生的应变, 从而分析岩样卸载前的应力状态。该方法是通过建立测试部位所受 3 个方向的主应力比值与微观裂纹闭合产生的主应变之间的相关关系, 在已知一个方向主应力的条件下, 通过相关关系推算出其余 2 个方向主应力的值。可以看出, 该方法是一种二维地应力测试方法, 且因测量的应变极小, 导致精度较低。

(3) 非弹性应变恢复法(anelastic strain recovery method, ASR)

岩石是一种普遍具有流变性的黏弹性材料, 当岩心从原始赋存环境取出后, 岩心由于卸荷作用会发生非弹性变形恢复, 基于此, ASR 法认为岩石卸

荷的非弹性应变与原始荷载呈一定相关性, 可通过岩石非弹性变形量反算得到岩石原始地应力状态。ASR 法测试和解算基于岩心均质且各向同性的假设, 为了可靠地获得应力释放后岩心的非弹性应变恢复量, 测量一般在岩心被钻取后 2~4 h 开始, 且需要采用密封的方法, 保持岩心的近原位特性。由于测量的应变非常小, 容易受到一些因素的干扰, 如温度、含水率、孔隙压力、残余应变等, 因此测试结果对测试条件的可靠性要求较高。

(4) 岩心直径变形分析法 (diametrical core deformation analysis method, DCDA)

对于被钻头切削为等直径圆柱状的岩心样品, 由于应力释放, 岩心截面将变成椭圆形, 如图 10^[67]所示(图中, $S_{\max}$ 和 $S_{\min}$ 分别为孔井正交表面内的最大主应力和最小主应力, d_1 和 d_2 分别为岩心最大直径和最小直径)。DCDA 法通过激光测距仪测试岩心的直径曲线, 根据线弹性理论即可计算平面上最大和最小水平主应力的差值, 岩心截面椭圆长轴方向即最大应力方向。DCDA 法建立在均质且各向同性的基础上, 可以获得平面内的主应力差值和主应力方向。DCDA 法不受钻孔的深度和温度环境限制, 测量成本低, 不需要对岩心进行切磨加工, 有利于深部岩心的重复利用。此方法可作为获取地应力的有效补充, 与其他方法结合, 提高测试结果的准确性。

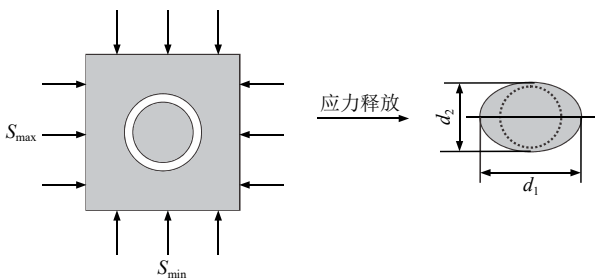


图 10 岩心直径变形分析法^[67]

Fig.10 Diametrical core deformation analysis method^[67]

(5) 岩心定向技术

基于岩心的地应力测试方法测量得到的岩心应力状态需要归位到原位岩体中去, 因此需要对岩心定向。岩心定向的直接方法是实施定向取心, 定向取心技术主要包括非机械法和机械法 2 种。非机械法的原理是利用钻探施工岩体中已知定向的、发育较好的构造面进行岩心定向。当构造面的产状未知时, 需要采用机械方法进行岩心定向, 具体方法有岩心桩法和岩心管法。对于非定向取心岩样, 需要重新定向, 最常用的是古地磁定向, 利用沉积岩石含有的铁磁矿物具有记忆地磁方向的能力, 通过实

验室退磁方法获得原生、天然和次生剩磁等矢量, 以此对岩心进行定位。

5.3 岩体波速钻孔原位测试技术

岩体波速钻孔原位测试技术主要是通过测定弹性波(体波为主)在岩体内的传播特性, 利用弹性波的参数(波速、衰减因数、波形、频率、频谱、振幅等)变化反映岩体物理力学性质的变化、节理裂隙发育情况及岩体完整程度等, 具有快捷、无损的特点。主流的岩体波速钻孔原位测试技术是基于纵波(压缩波)或者横波(剪切波)的传播特性反映岩体性质。

5.3.1 岩体纵波波速测试

根据弹性波发射与接收是否在同一钻孔内又分为单孔测试和跨孔测试。单孔测试可采用一个发射器和一个接收器的单发单收式测试, 即直接利用发射和接收时间差来计算波速, 也可以采用 1 个发射器和 2 个接收器的单发双收式测试, 即利用 2 个接收设备获取的信号时间差来计算波速。

(1) 单孔纵波测试

以单发双收式测试设备为例(见图 11)分析, 当环形换能器发射纵波后, 被第一个接收器拾取波形的时间为 t_1 , 被第二个接收器拾取波形的时间为 t_2 , 2 个接收器之间的距离为 ΔL , 则纵波在岩体中的传播速度 v_p 可以表示为

$$v_p = \frac{\Delta L}{t_2 - t_1} \times 10^{-3} \quad (1)$$

式中: ΔL 为两接收换能器之间的距离(mm), t_1 为靠近发射换能器的接收换能器接收到的首波初至时间(μs), t_2 为远离发射换能器的接收换能器接收到的首波初至时间(μs)。

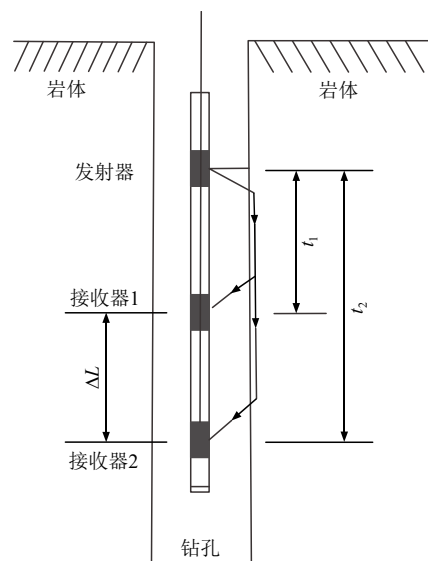


图 11 单发双收式测试方法

Fig.11 Test method with one emitter and double receivers

单孔测试操作简便, 工程中常用于评价岩体的质量, 如建立岩体质量控制标准、分析应力条件、测试方式、施工爆破等因素对岩体工程特性的影响, 测定地下巷道围岩松动圈的范围及演化过程, 分析不同埋深或者围岩等级下岩体松动圈的特征等。有学者基于大量的测试数据进行统计分析, 建立了纵波波速与岩体质量指标^[68]、岩体变形模量^[69]、地质强度指标^[70]、岩体扰动参数^[71]等参数的经验公式。

(2) 跨孔纵波测试

跨孔测试利用直达波从发射换能器到接收换能器之间的传播时间和距离计算波速, 可根据现场的测试条件及测试剖面数量排列钻孔, 在不同钻孔的相同深度位置放置一个换能器(发射器或者接收器), 根据剖面数量可同时采用一个发射器与多个接收器, 也可采用一个发射器与一个接收器在不同钻孔内进行循环测试。

以单剖面测试为例(见图 12)分析, 测试中要求发射器与接收器位于相同高程, 纵波发射后被接收器拾取的时间为 t_p , 发射器与接收器之间的距离是 L_p , 考虑测试系统的延时 t_0 , 则纵波在岩体中的传播速度 v_p 可以表示为

$$v_p = \frac{L_p}{t_p - t_0} \times 10^{-3} \quad (2)$$

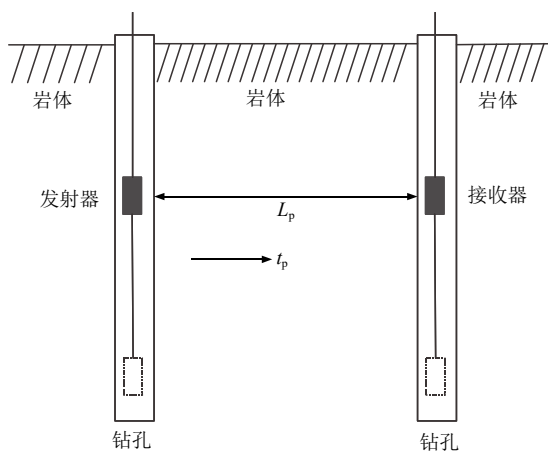


图 12 跨孔纵波测试设备

Fig.12 Test equipment for cross-hole longitudinal wave testing

跨孔测试多用于评价坝基、隧道围岩等工程范围较大的岩体质量, 又或者结合智能算法建立新的岩体完整性评价指标。杨静熙等^[72]研究成果表明, 同一工程中单孔纵波测试的结果比跨孔测试的结果偏高。

为了减少信号在空气中的衰减, 岩体纵波测试中换能器与岩体之间通常用耦合剂(水)作为转换介

质, 但是在破碎岩体或者软弱岩层中, 液态耦合剂的工作状态难以维持, 这是影响测试精度的重要因素。

5.3.2 岩体横波波速测试

岩体横波波速测试主要是利用直达波原理, 将信号通过岩体介质传到钻孔内的接收器, 以此来估算岩体的波速。岩体横波波速测试也可以分为单孔测试和跨孔测试, 单孔测试是在地表震源激发信号, 而跨孔测试则是在钻孔内激发信号, 在相邻的 2 个钻孔的相同深度位置接收信号, 2 种测试方法计算岩体波速的方法相同。

以单孔测试为例, 如图 13 所示, 2 个测点之间的距离是 ΔH , 则横波在岩体中的传播速度 v_s 可以表示为

$$v_s = \frac{\Delta H}{\Delta T} \times 10^{-3} \quad (3)$$

式中: ΔH 为两测点之间的距离(mm), ΔT 为剪切波从震源到达 2 个相邻测点的时间差(μs)。

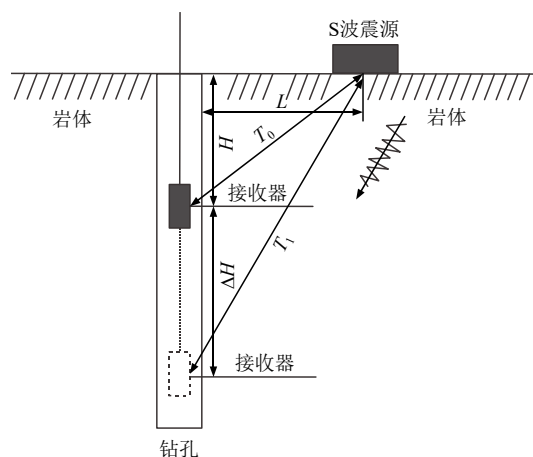


图 13 岩体横波测试设备

Fig.13 Test equipment for rock shear wave testing

单孔测试中, 剪切波从震源到达测点的时间需要进行斜距校正:

$$T = T_0 \frac{H}{\sqrt{L^2 + H^2}} \quad (4)$$

式中: T 为剪切波从震源到达测点经斜距校正后的时间(μs), T_0 为剪切波从震源到达测点的时间(μs), H 为测点的深度(mm), L 为从板中心到测试孔的水平距离(mm)。

岩体的横波测试结果可以用于计算地基动弹性参数、预测岩体物理力学性质、划分建筑场地的类别、评价岩土体质量、检验坝基灌浆效果等, 在岩土工程、交通工程、建筑工程等领域应用较多。

横波只能在固体中传播, 因此在测试时采用固

态耦合剂, 其要求比纵波测试更容易满足, 在破碎岩体、软弱岩层或者土体中测试的优势明显, 因此, 实际工程中可采用纵波与横波联合测试的方法来分析岩体性质的变化以及获取详细的地质断裂特征。

5.4 岩体结构孔内测试技术

5.4.1 岩体结构的钻孔光学测试

钻孔摄像光学探测是一种能获得钻孔井壁岩体结构直观图像的测井方法, 其原理是利用一种特殊的光学反射棱镜耦合器件, 将孔壁图像以全方位的形式连续显示出来, 完整地记录了孔壁岩体结构面信息, 包括层理、裂隙、孔隙及其所在深度和方位信息。

在岩体结构的钻孔光学识别和分析方面, 国内外学者开展了大量研究。W. Al-sit 等^[73]利用多分辨率纹理分割和辨识技术, 通过与改进的 Hough 变换迭代相结合, 完成了钻孔孔周岩体结构面的随钻辨识。S. J. Li 等^[74]提出了利用钻孔光学观测岩体裂隙的 ISRM 建议方法, 系统规范地提出了观测设备、步骤和分析方法。

5.4.2 岩体结构的钻孔雷达探测

钻孔雷达反射法通过电磁波的走时、振幅和相位等信息来识别岩体结构特征。为了获取较高的分辨率, 并能够较为详细地探测和准确评估地下深部区域的地质条件, 将雷达天线设在钻孔内是一个较好的方法。目前钻孔雷达使用的天线频率一般为 100 MHz, 具备探测钻孔周围半径 10~20 m 岩体结构的能力。钻孔雷达反射法为实现定向探测功能, 通常有 2 种解决路径: 一是通过布置均匀圆阵接收天线, 再结合接收波的不同时间来计算方位信息; 二是通过定向发射电磁波和接收天线, 获取目标体的方位信息。目前钻孔中的雷达多为偶极子天线, 因此后者实现难度较大, 目前大部分学者做定向雷达的思路集中在阵列式接收上。李术才等^[75]发展了定向钻孔雷达, 基于阵列天线, 获取了结构面的方位信息。S. Ebihara 等^[76]首次将多信号分类(multiple signal classification, MUSIC)算法在定向钻孔雷达系统中实现了应用。刘四新等^[77]提出了 BS-MUSIC 方法, 实现了井旁目标的三维成像, 并通过数值模拟的结果进行了验证, 取得了很好的效果。但目前市面上依然缺少可定向的钻孔雷达系统, 主要难点还是在于以下 2 个方面: (1) 在狭小的钻孔探头中要实现多个阵列天线的安装, 并保证屏蔽效果是较为困难的; (2) 由于钻孔的存在, 反射波的拖尾现象更加明显, 导致 MUSIC 算法在处理实测数据时依

然面临很大挑战。为提高探测精度, 可根据实测数据的特性, 优化 MUSIC 算法的参数设置, 如阵列布局、信号子空间和噪声子空间的划分等, 这有助于提高 MUSIC 算法在实测数据中的分辨率和准确性。再者, 将 MUSIC 算法与其他算法如波束形成算法、子空间分解算法等相结合, 进行联合处理, 这可以充分利用各种算法的优点, 提高钻孔雷达探测的准确性和效率。

6 深部工程围岩分类与参数取值

近年来, 随着深地工程的不断推进, 面向国家深部地下工程建设重大需求, 超深复杂高能地质环境带来了围岩分类方法有效性、可操作性以及已有围岩分类方法适宜性等难题, 亟待攻克。构建新型深部工程地质围岩分类方法体系并确定相对应的参数取值是保障深部工程安全建造、运营的必要手段。同时, 人工智能、数字孪生、智能感知、云计算等新兴技术的出现, 也不断催生出传统分类方法的应用新模式。

6.1 深部工程围岩分类

6.1.1 深部工程围岩分类参数指标选择

围岩分类参数指标是构建围岩分类方法体系的基础。其能够将围岩状态反馈给研究者, 以便运用多种手段进行围岩分类研究。水利水电地下工程建设过程中常用的施工方式包括钻爆法施工和 TBM 施工。2 种不同的施工方式对围岩性状的要求有所差异, 对应的围岩分类方法也各具特点。其中 TBM 围岩分类和掘进参数相关性较高, 本部分仅针对钻爆法形成的洞室围岩分类方法进行探讨。目前, 众多围岩分类方法包含多样的参数指标, 有必要对这些参数指标进行梳理并讨论其受深部工程复杂高能地质环境的影响, 从而明确后续研究的重点和方向。

6.1.2 深部工程围岩分类参数类型及基础指标

总结国内外常用的钻爆法围岩分类方法, 包括 RMR, Q, R_{Mi}, GSI, BQ, HC 法, 这些方法的参数指标均致力于全面反映围岩的岩体质量, 并考虑赋存环境中的地下水、地应力和工程扰动对围岩质量的影响。据此将这些参数指标概括为 3 个部分: 围岩岩体结构特征、赋存环境特征指标和工程扰动因素指标。表 4 对上述典型围岩分类方法在应用过程中所考虑的因素进行统计。

表 4 常用围岩分类方法中指标对比

围岩分类方法	围岩岩体结构特征			工程因素	赋存环境特征	
	完整岩块	围岩结构空	围岩结构面自		地应力	地下水
	强度特征	间几何形态	身发育状况		特征	状况
RMR	○	○	○	○	×	○
Q	○	○	○	×	○	○
RMi	○	○	○	○	○	○
GSI	×	○	○	×	×	×
BQ	○	○	○	○	○	○
HC	○	○	○	○	○	○

注：○为考虑；×为不考虑。

6.1.3 深部工程复杂环境对围岩分类影响

在高地应力区，围岩的变形与破坏机制呈现出更为复杂的特征。高地应力显著改变了围岩的应力分布，进而对其承载性能及稳定性评估结果产生深远影响。因此，评估深部地下工程地应力水平，对优化围岩分类方法、准确评估围岩类别具有重要意义。

在深部高地应力环境下，硬岩环境中的地下洞室开挖必然导致周围围岩一定范围内的应力重分布，呈现局部应力集中和表部应力释放，并表现出多种高地应力相关的破坏现象，包括张开开裂、剥离、板裂、片帮、岩爆等。此外，在工程开挖通过断层、挤压破碎带、软弱岩层时，在高地应力影响下可能出现弯折内鼓、塑性挤出和围岩变形。可见，深部工程在开挖过程中受高地应力影响，围岩将发生进一步劣化造成围岩质量等级下降。因此，在进行围岩类别划分时，考虑高地应力的影响十分必要。据此，申艳军等^[78]广泛收集大型水电工程地应力状况资料，根据分析结果建立新的地应力水平划分方法，并针对 HC 法在高地应力区的应用进行优化。与此同时，高地温所造成的工程建设影响也在近年来日益凸显。表 5 统计了部分高地温环境下的典型地下工程。

表 5 部分高地温环境地下工程

序号	工程名称	最高温度/℃
1	齐热哈塔尔水电站引水隧道	98
2	布仑口—公格尔电站引水隧洞	82
3	娘拥水电站引水隧洞 1#支洞	78
4	禄劝铅厂引水隧洞	76
5	洛古水电站引水隧洞 3#支洞	47
6	黑白水三级电站引水隧洞	45

由于岩石组成矿物颗粒和粘结物的热膨胀系数存在差异，高温会使岩石内部产生显著的温度应力。刘泉声和许锡昌^[79]发现当温度高于 75 ℃时，花岗岩的弹性模量 E 随温度升高而降低，从而提出了热损伤的概念，即岩石温度变化时会在内部产生热应力。陈国庆等^[80]指出温度变化引起的温度应力会加剧围岩的应力集中现象。可见，高地温对地下工程围岩的影响不可忽视，但传统的围岩分类方法并未考虑高地温带来的影响。需要注意的是，深部工程高地温和高地应力并不是孤立存在的，相关研究指出温度对地应力存在明显影响。因此，深部工程围岩分类应考虑高地温和高地应力对围岩的耦合作用。

6.1.4 工程因素对深部工程围岩分类影响

除地质体本身固有的自然属性之外，随着地下工程规模扩大化和布置形式复杂化，人为改造因素对围岩质量影响越来越大，表现为深部岩体的结构面劣化和应力状态改变。

(1) 开挖尺寸对围岩分类的影响。围岩在不同地质时期承受不同方向的地应力，导致多组结构面分布，开挖后，这些结构面与开挖临空面构成的各种组合，对地下洞室围岩稳定性产生重要影响。根据块体理论的相关概念，地下洞室的开挖使得结构面与临空面在三维上对地下岩体进行切割，形成不稳定块体，易发生局部失稳破坏。

(2) 开挖走向对围岩分类的影响。开挖走向对地下工程围岩的影响，一方面主要体现在临空面走向与岩层节理产状的组合关系对洞室块体稳定性的影响。因此在进行深部工程围岩分类时，应充分考虑开挖走向与岩体结构面产状的相互关系。另一方面，开挖走向与地应力方向之间的组合对地下工程的围岩稳定性存在影响。大量的工程案例表明，地下洞室纵轴线应与原始应力场中的最大主应力方向呈小角度相交，有利于洞室上下游边墙的围岩稳定。在结构面组合影响方面，地下洞室洞轴线应与主要结构面方向呈大角度相交，从而避免较大的侧向压力作用在地下洞室上、下游端墙。

(3) 开挖形状对围岩分类的影响。开挖形状直接影响围岩应力的分布形式。理想的开挖形状应使开挖体周围的应力分布均匀，通常为链环形或椭圆形。然而，实际工程中难以达到这种理想形状，需要在设计中考虑应力集中和偏压剥离现象，以确保围岩的稳定性。在地下洞室开挖建造过程中，开挖面附近的围岩由于应力释放和工程扰动，其应力

会进行重分布,这种由开挖卸荷引起的应力调整,导致围岩产生不同程度的损伤,从而降低围岩岩体质量。

(4) 开挖方法对围岩分类的影响。不同的开挖方法对围岩损伤程度不一样,如钻爆法施工,在爆破扰动下岩体结构的损伤和劣化尤其明显。例如,钻爆法由于爆破扰动,使原有结构面组合条件下裂纹的进一步扩展,降低岩体强度、完整性,使原本闭合的结构面张开,进而降低围岩岩体质量。

6.1.5 深部工程围岩分类指标确定

深部工程围岩分类所涉及的参数指标众多,分析各个参数指标之间的内在关系有利于提高现场参数指标取值效率,方便构建集成化深部工程智能围岩分类方法。综合各国围岩分类方法,岩体结构空间几何形态评价指标包括: RQD 、节理长度(S)、节理组数(J_n)、块体体积 V_b (m^3)、岩体结构类型分值 SR 或块、完整性系数 K_v 。

在评价围岩岩体强度特征时,可直接采用强度指标或赋予相应分值进行评价。针对深部赋存环境岩体结构面发育特征、地应力水平、地下水状况等指标关联性的研究,申艳军等^[81]建立了评价指标的内在关联图。深部工程扰动对围岩分类影响不可忽视,如钻爆法、TBM 施工扰动下的围岩划分是目前深部工程围岩分类的热点,也是难点。

6.1.6 深部工程围岩分类指标“AI+”智能判识方法

近年来,随着计算机技术不断发展,地下工程围岩地质信息感知正逐步向数智化方向演进。其中,结构面的识别并获取其几何信息对研究围岩的结构空间几何形态具有重要意义。如今,非接触测量技术在岩体结构面信息采集中的应用日益广泛。国内外学者开展了大量关于摄影测量技术和三维激光扫描技术应用于岩体结构面识别的研究工作^[82]。摄影测量技术方面,近年来多采用双目视觉成像技术、多目视觉成像技术,即通过2个或多个摄像头获取图像信息。三维激光扫描技术方面,架站式、移动式三维激光扫描较为适用于地下工程建造场景,其原理是通过激光器发射的激光束测量与目标物之间的距离,以获取目标物的三维激光点云数据。此外,综合应用2种方法,能够获取包含丰富色彩的图像信息和精确位置信息的点云数据。

摄影测量技术和三维激光扫描技术这类非接触测量技术主要用于获取围岩可视部分的结构面特征参数,但这类方法无法对围岩内部的情况进行探测。据此,部分研究者开展了基于超前钻探数据反映掌

子面岩体质量等级的研究^[83]。然而这种方法需要大量的数据支持,以便通过公式拟合回归来揭示变量之间的关联。另一方面,基于超前地质钻探产生的大量数据,部分研究者也采用人工智能方法研究各个随钻参数所包含的地质信息,为地下工程围岩分类提供依据。

6.2 深部工程围岩参数取值

6.2.1 基于声波测试岩体力学参数取值

声波测试是一种非破坏性、方便高效且经济的测试手段,在深部工程岩体力学参数取值中发挥着重要作用。岩体波速与一些岩体的物理力学参数密切相关,因此可以通过测量岩体波速来间接反映岩体的力学性质。

N. Barton^[84]通过统计挪威、瑞典和中国的硬岩隧道岩石工程数据,总结了岩体波速 V_p (km/s) 与岩体质量指标 Q 之间的关系:

$$Q = 10^{V_p - 3.5} \quad (5)$$

随后 N. Barton^[84]又提出了岩体评分系统(RMR)分类值与岩体波速之间的关系:

$$RMR = 15V_p - 2.5 \quad (6)$$

根据 N. Barton^[84]岩体质量指标 Q 和岩体变形模量 E_{mm} 存在关系,因此 E_{mm} 可以通过岩体波速 V_p 进行表达^[85]:

$$E_{mm} = 10 \times 10^{(V_p - 3.5)/3} \quad (7)$$

6.2.2 基于 Hoek-Brown 准则的岩体力学参数取值

Hoek-Brown 强度准则最早在 1980 年提出,用于预测岩石在复杂应力状态下的破裂行为。之后, E. Hoek 等^[86]提出了广义的 Hoek-Brown 非线性经验公式,该公式扩展了其适用范围至岩体,具体形式如下:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^a \quad (8)$$

式中: m_b , a , s 为岩体的材料参数; s 反映岩体的破碎程度,取值范围 0.0~1.0,对于完整的岩体(即岩石), $s = 1.0$ 。

1988 年 E. Hoek 和 E. T. Brown^[87]结合岩体评分系统(RMR),提出了参数 m_b , s , a 的取值方法:

(1) 扰动岩体:

$$\left. \begin{aligned} m_b &= m_i \exp \left(\frac{RMR - 100}{14} \right) \\ s &= \exp \left(\frac{RMR - 100}{6} \right) \\ a &= 0.5 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

(2) 未扰动岩体:

$$\left. \begin{aligned} m_b &= m_i \exp\left(\frac{RMR-100}{28}\right) \\ s &= \exp\left(\frac{GSI-100}{9}\right) \\ a &= 0.5 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中: m_i 为完整岩石的材料参数。但上述方法未考虑岩体含水条件, 且仅适用于某些特定的非连续面, 无法适用于较破碎岩体。为此, E. Hoek 和 E. T. Brown^[88]提出了结合地质强度指标(GSI)、扰动系数 D 的岩体参数 m_b , s , a 取值方法:

$$\left. \begin{aligned} m_b &= m_i \exp\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right) \\ s &= \exp\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right) \\ a &= \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left[\exp\left(\frac{-GSI}{15}\right) - \exp\left(\frac{-20}{3}\right) \right] \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

后续大量学者对该取值方法进行了完善, 夏开宗等^[89]通过考虑岩体的地震波速度和声波速度, 建立地下洞室围岩损伤区内地质强度指标 GSI 值和岩体扰动因子 D 值的计算公式:

$$\left. \begin{aligned} GSI &= 15V_p - 7.5 \\ D &= 2 \left[1 - \frac{10^{(V_{ud}-3.5)/3}}{10^{(V_d-3.5)/3}} \right] \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中: V_{ud} 为未扰动岩体波速, V_d 为受到扰动时的岩体波速。

综上, 这些研究成果不仅从多个方面为 GSI 的合理取值奠定了基础, 还能够弥补工程实践过程中 GSI 取值的随意性, 提升了岩体力学参数取值的准确性。

6.2.3 工程地质类比法参数取值

在深部岩体工程的设计领域中, 工程地质类比法作为一种传统的且行之有效的设计方法, 已被广泛采纳于诸多关键工程实践, 并得到了相关重要规范和标准的明确支持。尽管该方法存在一定的局限性, 但在实践中, 通过将其与理论计算、现场监控等现代技术手段相结合, 能够显著提升设计的科学性和可靠性。

从工程地质力学综合集成理论的视角深入剖析, 工程类比法的理论基础及其在实际应用中的价值得以更加清晰地展现。在深部岩体工程的设计过程中, 应用工程类比法需要全面而系统地考虑所有与工程相关的因素, 这些因素可大致划分为易变因

素和基本因素两大类。易变因素通常指那些随时间或环境条件变化较大的因素, 如地震活动、施工方法等; 而基本因素则是指那些相对稳定、变化不大的因素, 如地层岩性、地质构造、围岩结构、风化差异以及岩体的力学行为特征等。此外, 针对工程开挖应用场景, 工程类比方法的几何条件也应作为一项重要的基本因素加以考量。在多数情况下, 地下水条件同样可以归为基本因素的范畴。

6.2.4 综合评判法参数取值

综合评判法通过综合考虑多种因素和指标, 提供了一种全面、系统的参数确定方法。通常考虑以下几个方面:

(1) 多指标综合评估

综合评判法不仅关注岩石的单轴抗压强度、弹性模量等基本力学参数, 还引入了如岩体体积节理数(J_v)、结构面条件因子(J_c)、完整岩心长度指标(RCL)以及地质强度指标(GSI)等多个指标。这些指标从不同角度反映了岩石的物理力学性质, 为参数确定提供了更为全面的依据。

(2) 现场监测与室内数据结合

该方法强调现场监测数据与实验室实验数据的有机结合。通过现场原位监测, 获取岩石在真实工程环境下的应力、应变及变形等数据; 同时, 利用室内试验对岩石样本进行力学性能测试。将两者相结合, 可以更加准确地反映岩石的力学行为, 提高参数确定的可靠性。

(3) 定量分析与定性判断相结合

综合评判法不仅采用定量分析方法对岩石力学参数进行计算和评估, 还结合了专家经验和定性判断。通过专家对地质条件、岩石类型、工程特点等方面的综合考量, 对定量分析结果进行修正和完善, 确保参数确定的合理性和适用性。

综合评判法通过多指标综合评估、现场监测与实验数据结合、定量分析与定性判断相结合以及考虑地质条件与工程因素的复杂性等方面, 提高了参数确定的准确性和可靠性。

6.2.5 基于智能反演岩体力学参数取值

深部工程力学特性的准确模拟对于灾害预测和支护设计至关重要。然而, 岩体力学参数的合理取值是一大挑战。对此, 冯夏庭和杨成祥^[90]提出了基于现场监测信息的三维智能反演方法。该方法利用智能反演技术, 结合现场监测的围岩开挖响应数据, 确定岩体力学参数。考虑深部工程地应力场与工程空间关系的复杂性, 以及岩体破坏变形的几何非对

称性和空间非均匀性,方法特别关注围岩内部破裂行为,并引入人工智能技术提升求解效率和结果可靠性。

深部工程岩体力学参数反分析是一个多参数非线性优化问题,解的稳定性和唯一性是关键。以遗传算法为例,结合神经网络映射模型,形成进化神经网络反分析过程,通过不断迭代优化,逼近实测三维围岩内部位移和损伤区信息,从而识别待反演的深部工程硬岩力学参数,这些参数通过工程验证,进而为灾害防控提供科学依据,优化设计和施工过程。

7 深部工程地质勘察技术发展趋势

7.1 深部工程地质勘察定向钻探技术发展趋势

随着国家战略工程的推进,深部地下工程面临着高地应力、高地温、高渗透压等一系列复杂地质条件的挑战,深部工程地质勘察钻探技术在以下两方面亟需发展:

(1) 深部复杂与极端地质条件下,工程勘察钻探均面临诸多难题,如孔壁稳定、泥浆护壁、取心质量与效率、孔斜与轨迹控制、漏失与堵漏、事故预防与处理等问题,导致施工效率低下甚至钻孔报废,亟需研发深孔复杂地层钻探技术与智能装备。

(2) 随着西部高原山区重大工程建设的不断开展,如某西部铁路、中尼铁路、某重大水电工程和重大引水工程等,长大深埋隧道(洞)勘察十分困难,有时还需曲线取心穿越障碍物或曲线到达勘察目标点位,钻探装备搬迁和生态环境保护矛盾日益突出,钻进效率低下,亟需研发深部工程定向取心勘察技术与智能装备。

(3) 在深部工程地质勘察定向钻探中,准确量化评估不同类型复杂地层(如高地应力、强涌水、坚硬致密弱研磨性地层等)对钻探设备和工艺的具体影响程度,是选择合适的钻探设备和工艺的关键。然而,量化评估不同类型复杂地层对钻探设备和工艺的具体影响程度是一个复杂而多维度的问题,需要从地层特性对钻探的影响、钻探设备对复杂地层的适应性以及钻探工艺对复杂地层的适应性等多个方面进行综合考虑,目前尚没有一个统一、全面的综合评价指标体系。未来可以考虑从设备适应性、工艺有效性、成本效益以及安全环保等几个方面构建综合评价指标体系,并通过实验室模拟试验、专家评估与经验总结、数值模拟与仿真以及现场试验

等手段实现量化评估不同类型复杂地层对钻探设备和工艺的具体影响程度。

7.2 深部工程地质勘察物探技术发展趋势

(1) 在物探传感装置优化、实现精细化探测方面,受地形地貌复杂环境影响,核心是如何在低频条件下克服干扰,从而提升探测深度,以及提升深部的探测精度;其次是传感装置多维化布置,提升探测精度,减少各向异性介质的影响。

(2) 在数据智能化解译、提升效率方面,随着物探技术愈发精密且传感信号数量增多,单位时间内的数据量呈几何数级增加,常规的数据解译方法难以满足勘探现场的效率需求。因此,借助人工智能、深度学习技术,对采集的多种数据进行快速的智能化解译可能是关键趋势之一,推动物探勘察技术向智能、自动、实时的方向发展。

(3) 在多源数据采集融合、提升采集效率方面,在深部工程地质勘探中,获取完整且准确的地层信息往往依赖于多种测试技术的综合应用。由于现有测试技术基于不同的物理原理,导致在实际操作中需要进行多次独立的测量,这不仅延长了勘探周期,降低了总体采集效率,且不同物理原理的测试技术所采集的数据在时间和空间上的一致性较差,这导致数据同步困难,融合结果误差较大。因此,需要发展将多种探头集成的一体化设备,实现多源数据的同步采集与融合,以确保原始数据的时空一致性。

此外,目前传感器种类繁多,采集的数据类型庞杂,且不同类型传感器采集数据精度差异较大,获取的数据质量参差不齐,这也给多源数据融合带来了较大困难,直接影响融合结果的准确性。因此,未来可研发更先进的数据标准化技术和数据清洗技术,确保输入参数的准确性。

7.3 深部工程勘察随钻随掘技术发展趋势

随掘技术方面,国内外地下工程施工工期物探方法较多,这些方法均广泛地在钻爆法隧洞中应用,能有效探查隧洞不良地质。当前针对广泛采用的TBM法施工隧洞,形成了以TBM与物探设备相结合的掘探一体化探测模式,促进了TBM掘进期间超前地质预报技术的发展,其中随掘地震、随掘电(磁)法2类探测技术是目前主要研究与应用的方法,多技术融合的超前探测与TBM形成一体化技术是未来深部工程掘进的发展趋势。

随钻技术方面,现有随钻探测技术逐渐向钻机集成化、采集装配化的方向发展:(1) 发展孔底随钻智能直感探测技术,目前大部分钻进参数监测多

局限于对油压参数的监测,间接换算成钻进的扭矩、压力等信息,间接换算会导致参数测试不准确、不及时。尽管目前出现了近动力头的量测方式,但是量测值与实际钻头破岩的参数之间仍然需要杆长修正。(2) 发展多模式钻进下的测试技术,现有测试装备多集中于回转旋削的钻机,对于旋切-冲击式的钻进,往往由于高频的振动影响了测试单元的长期稳定性和可靠性。

钻爆法和 TBM 施工都已形成了众多具有实际应用效益的围岩分类。但由于 TBM 掘进过程中岩-机之间的狭窄空间无法满足常规探测设备架设的要求,为满足 TBM 施工过程中围岩类别实时、动态判识的要求,研究者们开展了关于采用 TBM 相关掘进参数进行围岩分类和可掘性评价的工作。随着人工智能、数字孪生、智能感知、云计算等新兴技术的不断发展,构建适应不同地质环境的实时、动态围岩分类方法,将是未来研究的重点。

7.4 深部岩体特性原位试验和测试技术发展趋势

(1) 在岩体力学参数原位试验方面,虽然目前已经开发了众多适用于原位岩体强度测试的方法,但这些测试大多依赖于专门的设备和仪器,其购置、运输、搭建和维护的费用相对较高。此外,现场的地质条件、气候条件等环境因素也可能对测试结果造成显著的影响,岩体的非均质性和复杂性进一步加大了原位测试结果的离散性。即便对同一地点进行多次测试,由于各种不确定因素,其结果也可能存在较大的差异,这对深部岩体强度的精准评估构成了重大挑战。随着人工智能技术的飞速发展,在大数据驱动下的岩体力学参数估计方法也在不断地发展,并得到了工程应用。通过对大量岩土工程数据的采集与分析,并结合先进的机器学习算法,构建岩石力学参数的预测模型,这样的模型使得在多样化的工程环境和条件下对岩体力学参数的估计既快速又准确。

(2) 在岩体地应力测试方面,由于地应力成因复杂、影响因素多,且各种地应力测试技术的假设和计算方法不同,因此具有各自的优缺点。首先,随着勘察数字化和智能化发展,地应力测试需要逐步实现测量装备集成化和智能化,研发适应深部环境的地应力智能测试装备,研制新型耐高温、高压的水压致裂装备,研制抗温度、岩石破裂干扰的应力解除法测试装备。其次,亟需建立深部高地应力下地应力非线性解译方法。与浅部工程相比,深部环境岩体独特的“三高一扰动”特性,使岩体的各

项力学性能处于黑箱或灰箱状态,传统的理论分析方法存在适用性问题,需要研究深部高能赋存环境下的岩石力学机制,并基于此研发相应的地应力测试设备。此外,为适应深部工程灾害防控需求,亟需研发岩体应力演化(扰动应力)测试技术和装备,跟踪和掌握地下工程开挖后应力时空分布及其演化特征。

(3) 在岩体结构探测方面,钻孔光学测试仅能够对钻孔壁岩体结构进行表面观测,无法识别孔外的隐伏岩体结构面。由于深部工程岩体结构面发育更加密集和复杂,隐伏岩体结构面往往是深埋隧洞的工程勘察、灾害风险评估和支护设计施工的关键,这时往往需要钻孔雷达等其他地球物理测井手段作为补充,目前尚未有成熟的定向钻孔雷达技术。钻孔光学测试虽可以观测到穿钻孔的岩体结构面的倾向、倾角等几何参数,但仍需发展光声电磁联合技术以解决钻孔一定范围岩体结构及其定向成像的难题。此外,钻孔的存在使得反射波的拖尾现象更加明显,从而加大了 MUSIC 算法处理实测数据的难度。未来还需通过加强数据预处理与特征提取以及优化 MUSIC 算法参数来应对这一挑战。比如,在应用 MUSIC 算法之前对数据进行去噪、滤波等预处理,以提高数据的质量。

7.5 深部工程地质围岩分类发展趋势

随着各项信息获取能力的不断丰富,研究者面对深部工程建设能够从多方面对围岩状态进行感知,同时所获得的数据尺度也在逐渐增长,这就使得研究者能够基于大数据对未来的深部工程围岩进行分类研究。由于传统的围岩分类方法较少地考虑高能地质环境对围岩质量的影响,且单一的围岩分类方法往往难以实时、全面反映围岩质量状况。因此,以海量的多源异构数据为基础,通过解构和集成多种围岩分类方法,结合新数据类型,充分考虑各方因素对深部工程围岩质量的影响,建立智能化围岩分类集成方法,能够促进高能地质环境下工程的安全建造和运营。此外,人工智能技术因其在大数据处理及分析方面具有巨大优势,目前正被运用于构建适应不同地质环境的实时、动态围岩分类方法,以实现工程施工的有效指导。

7.6 深部工程岩体力学参数取值发展趋势

深部岩体力学参数取值方法的发展前景展现出智能化、自动化、多场耦合研究、新型实验手段与数值模拟优化以及标准化与规范化的趋势。未来,人工智能和自动化监测设备将显著提升参数取值的

准确性和效率，而多场耦合作用的研究将促进更全面的力学行为预测。新型实验手段和优化的数值模拟方法将进一步增强数据支持，同时综合考虑岩石自身性质与工程因素将提高参数取值的科学性。此外，标准化与规范化的发展将确保参数取值的一致性和可比性，共同推动深部岩体力学参数取值方法的不断进步与完善。

7.7 多技术协同的未来深部工程灾害综合防控体系

深地工程面临高地温、高地应力、高渗透压等复杂地质环境，在此背景下，各类工程灾害如岩爆、突水突泥等势必异常突出，单一的勘察手段将难以应对如此复杂局面。未来，通过各勘察技术间的协同，取各技术所长，针对不同类型工程灾害研制个性化监测预警系统，进而建立综合防治体系是解决此类问题的重要努力方向。比如中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司正在研发基于无源无线传感技术的岩爆预警系统，通过定制的传感器感知围岩应力并将测量数据上传云端，形成数据库；再借助人工智能手段进行大数据挖掘，在此基础上建立岩爆判据，进而实现深地工程岩爆预判预报。此外，中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司融合了超前物探(包括但不限于 TSP、TRT、地质雷达、瞬变电磁、高密度电法、红外测试、激发极化法)、超前勘探(洞、孔)、试验测试、监测检测以及开挖机械掘进信息等 7 大类工程全阶段全信息指标，开发了 GIM-Smart 系统平台，运用数学地质方法和人工智能手段进行综合解译分析，实现了智慧化超前地质预报。未来，中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司将进一步结合深地工程特点，融合更多勘察技术，构建强大数据底座，为高效训练机器学习和深度学习模型提供坚实基础，使深地工程灾害超前综合预报防治向更智能、更精准方向迈进。

7.8 多学科协同创新的未来深部工程地质勘察技术

由于深部地质环境复杂，探测技术水平有限，且深地环境中的岩石力学理论、深地科学规律尚不明确，深地工程将面临一定程度的盲目性、低效性和不确定性。针对此问题，未来深部工程地质勘察技术的发展还需进一步加强包括地质学、岩土工程、地球物理学、环境科学、工程学、计算机科学、材料学等在内的多学科协同创新，建立跨学科研究平台或合作机制。为更好地服务国家重大工程，推进深地工程，孵化新兴产业，中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司成立了专门的深地研究机构，准备从深地勘探测试、深地岩土力学研究、深

地空间建造以及深地工程灾害防控等方面着手，联合国内高水平研究机构 and 高校，探索建立从深地工程勘察设计到健康运维的全链条多学科跨机构研究平台。

8 结 论

水利水电深部工程建设是国家基础设施建设和能源资源开发的重要举措，深部工程地质勘察是工程安全建设和运行不可或缺的核心内容。传统的工程地质勘察技术难以适应西部极端工程地质环境，深部工程地质勘察面临盲目性、低效性和不确定性的关键难题和挑战。

现有深部工程地质勘察技术研究主要集中在定向钻探技术、物探技术、随掘随钻技术、岩体特性原位试验与测试技术、基于 TBM 随钻随掘参数的工程地质围岩分类方法等方面，研究成果为深部工程稳定性分析、动态设计、安全施工和灾害防控提供了基础数据和重要支撑。

针对深部工程地质勘察技术研究存在的问题，面向国家重大深部工程需求和多学科发展前沿，未来亟需开展的研究方向包括深孔复杂地层定向钻探技术与智能装备、岩体结构光声电磁一体化探测技术、岩体力学特性原位微损试验技术和深钻孔触探技术、岩体应力及其演化快速自动测试与非线性计算分析理论、基于大数据的勘察信息解译与数据融合技术、随钻随掘过程的勘察技术与装备、深部工程地质勘察技术的标准化和规范化。

致谢 本文在成稿过程中，中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司冉从彦正高级工程师、赵小平正高级工程师、杨 瀛博士，中国科学院武汉岩土力学研究所刘 鏐副研究员，东北大学赵 骏副教授；中铁西南科学研究院有限公司卢松正高级工程师，长安大学申艳军教授，中国地质科学院探矿工艺研究所吴金生研究员等参与了讨论，并给予了帮助，在此一并致谢。

参考文献(References):

- [1] 谢和平, 张 茹, 张泽天, 等. 深地科学与深地工程技术探索与思考[J]. 煤炭学报, 2023, 48(11): 3 959 - 3 978.(XIE Heping, ZHANG Ru, ZHANG Zetian, et al. Reflections and explorations on deep earth science and deep earth engineering technology[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(11): 3 959 - 3 978.(in Chinese))

- [2] 高德利, 黄文君. 深层、超深层定向钻井中若干基础研究进展与展望[J]. 天然气工业, 2024, 44(1): 1 - 12.(GAO Deli, HUANG Wenjun. Basic research progress and prospect in deep and ultra-deep directional drilling[J]. Natural Gas Industry, 2024, 44(1): 1 - 12.(in Chinese))
- [3] 苏义脑, 窦修荣, 高文凯, 等. 旋转导向系统研究现状与发展趋势[J]. 钻采工艺, 2024, 47(3): 1 - 8.(SU Yinao, DOU Xiurong, GAO Wenkai, et al. Research status and development trends of rotary steerable system[J]. Drilling and Production Technology, 2024, 47(3): 1 - 8.(in Chinese))
- [4] 吴金生, 黄晓林, 蒋 炳, 等. 水平绳索随钻定向钻进技术研究与应用[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(5): 260 - 264.(WU Jinsheng, HUANG Xiaolin, JIANG Bing, et al. Research and application of horizontal wire-line directional deviation correction while drilling[J]. Coal Geology and Exploration, 2021, 49(5): 260 - 264.(in Chinese))
- [5] 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.(MA Baosong, CHENG Yong, LIU Jiguo, et al. Tunnel accurate geological investigation using long-distance horizontal directional drilling technology[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(6): 972.(in Chinese))
- [6] 郭昆明. 高地应力下护孔钻进用套管的研制[J]. 煤矿机械, 2019, 40(5): 57 - 59.(GUO Kunming. Development of casing for casing drilling under high ground stress[J]. Coal Mine Machinery, 2019, 40(5): 57 - 59.(in Chinese))
- [7] 徐耀鉴, 张绍和, 杨 仙. 弱包镶金刚石钻头在高地应力地层中的应用研究[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2008, (1): 27 - 30.(XU Yaoqian, ZHANG Shaohu, YANG Xian. Research of diamond weak combined bit for high geo-stress stratum drilling[J]. Diamond and Abrasives Engineering, 2008, (1): 27 - 30.(in Chinese))
- [8] 张春林. 涌水钻孔施工工艺探讨——以新疆苇子沟矿区水文孔施工为例[J]. 中国煤炭地质, 2022, 34(3): 71 - 74.(ZHANG Chunlin. Discussion on water gushing borehole operation technology—A case study of hydrogeological borehole operation in weizigou coalmine area, Xinjiang[J]. Coal Geology of China, 2022, 34(3): 71 - 74.(in Chinese))
- [9] 时志兴. 河南省寺家沟银多金属矿区复杂地层绳索取心钻进技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2019, 46(3): 31 - 35.(SHI Zhixing. Wireline core drilling in complex strata in Sijiagou silver polymetallic mine of Henan Province[J]. Exploration Engineering(Rock and Soil Drilling and Tunneling), 2019, 46(3): 31 - 35.(in Chinese))
- [10] 王佳亮, 张绍和. 基于打滑地层的孕镶金刚石钻头设计[J]. 地球科学, 2016, 41(5): 895 - 900.(WANG Jialiang, ZHANG Shaohu. Design of impregnated diamond bit based on slipping formation[J]. Earth Science, 2016, 41(5): 895 - 900.(in Chinese))
- [11] BLÍŽKOSKÝ M, FUSÁN O, IBRMAJER J, et al. Geophysical phenomena of the deep structure in Czechoslovakia[J]. Journal of Geodynamics, 1986, 5(2): 165 - 178.
- [12] KRYLOV S V, MISHENKIN B P, BRYSKIN A V. Deep structure of the baikal rift from multiwave seismic explorations[J]. Journal of Geodynamics, 1991, 13(1): 87 - 96.
- [13] 潘志伟. 高精度反射波勘探在超埋深管道探测中的应用[J]. 科技与创新, 2024, (18): 179 - 181.(PAN Zhiwei. Application of high-precision reflected wave exploration in ultra-deep buried pipeline detection[J]. Science and Technology and Innovation, 2024, (18): 179 - 181.(in Chinese))
- [14] HAJNAL Z, TAKÁCS E, ANNESLEY I R, et al. Effective utilization of seismic reflection technique with moderate cost in uranium exploration[J]. Geophysical Prospecting, 2020, 68(1): 129 - 144.
- [15] 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.(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.(in Chinese))
- [16] OKAMOTO T, IIDA D, KOSHIKIYA Y. Distributed acoustic sensing of seismic wave using optical frequency domain reflectometry[J]. Journal of Lightwave Technology, 2023, 41(22): 7 036 - 7 044.
- [17] 杨 旭. 地震波法在岩溶隧道中的应用研究[J]. 黑龙江交通科技, 2022, 45(6): 137 - 139.(YANG Xu. Application of seismic wave method in karst tunnel[J]. Communications Science and Technology Heilongjiang, 2022, 45(6): 137 - 139.(in Chinese))
- [18] 李永鑫. 基于 S 变换与互相关的瑞雷面波频散曲线提取研究[学位论文][D]. 西安: 长安大学, 2023.(LI Yongxin. Research on extracting rayleigh wave dispersion curve based on s-transform and cross-correlation[M. S. Thesis][D]. Xi'an: Chang'an University, 2023.(in Chinese))
- [19] 杨 婷. 基于地震体波和面波成像的青藏高原东缘深部结构研究[博士学位论文][D]. 北京: 中国地震局地球物理研究所, 2024.(YANG Ting. Study on deep structures of the eastern margins of the Tibetan Plateau based on seismic body- and surface-wave travel time tomography[Ph. D. Thesis][D]. Beijing: Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, 2024.(in Chinese))
- [20] 谭 鑫. 隐伏断裂构造音频大地电磁法探测[J]. 工程地球物理学

- 报, 2018, 15(3): 376 - 382.(TAN Xin. Exploration of concealed fault structures in audio magnetotelluric method(AMT)[J]. Journal of Engineering Geophysics, 2018, 15(3): 376 - 382.(in Chinese))
- [21] 于双璐. 直无人机载航空宽频电磁探测采集系统研究[硕士学位论文][D]. 长春: 吉林大学, 2024.(YU Shuangyu. Research on airborne broadband electromagnetic detection acquisition system carried by UAV[M. S. Thesis][D]. Changchun: Jilin University, 2024.(in Chinese))
- [22] 章成广, 江万哲, 潘和平. 声波测井原理与应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009: 52 - 69.(ZHANG Chengguang, JIANG Wanzhe, PAN Heping. Principles and applications of acoustic logging[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2009: 52 - 69.(in Chinese))
- [23] 张斌山. 井下电视在延长油田吴起采油厂的应用研究[硕士学位论文][D]. 西安: 西安石油大学, 2020.(ZHANG Binshan. Application of downhole TV in Wuqi oil production plant of Yanchang oilfield[M. S. Thesis][D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2020.(in Chinese))
- [24] 欧莽平. 石油测井技术现状与发展趋向探索[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2019, 39(10): 197 - 198.(OU Mangping. Exploration of the current status and development trends of petroleum logging technology[J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2019, 39(10): 197 - 198.(in Chinese))
- [25] COBB C C, SCHULTZ P K. A real-time fiber optic downhole video system[C]// Proceedings of the Offshore Technology Conference. Houston, Texas: [s. n.], 1992: OTC - 7046 - MS.
- [26] MUKHLISS A E, DRIWEESH S M, SAGR A M, et al. First successful implementation of high temperature video camera to identify downhole obstructions in gas wells: a Saudi case[C]// Proceedings of the SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference. Manama, Bahrain: [s. n.], 2015: SPE - 172750 - MS.
- [27] 罗青平. VideoLog 网络高清井下电视技术及其应用[硕士学位论文][D]. 西安: 西安石油大学, 2019.(LUO Qingping. VideoLog Network HD Downhole TV[M. S. Thesis][D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2019.(in Chinese))
- [28] 向英. 井下电视成像技术在水库工程勘察中的应用[J]. 地下水, 2024, 46(4): 184 - 185.(XIANG Ying. Application of downhole television imaging technology in reservoir engineering investigation[J]. Groundwater, 2024, 46(4): 184 - 185.(in Chinese))
- [29] 刘四新, 王文天, 傅磊, 等. 基于 BS-MUSIC 的定向钻孔雷达三维成像算法[J]. 地球物理学报, 2017, 60(12): 4 928 - 4 937.(LIU Sixin, WANG Wentian, FU Lei, et al. 3D borehole radar imaging method based on BS-MUSIC[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017, 60(12): 4 928 - 4 937.(in Chinese))
- [30] 李术才, 许振浩, 黄鑫, 等. 隧道突水突泥致灾构造分类、地质判别、孕灾模式与典型案例剖析[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(5): 1 041 - 1 069.(LI Shucai, XU Zhenhao, HUANG Xin, et al. Classification, geological identification, hazard mode and typical case studies of hazard-causing structures for water and mud inrush in tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(5): 1 041 - 1 069.(in Chinese))
- [31] 姚林林, 张世殊, 崔中涛, 等. 双护盾 TBM 施工综合超前地质预报技术探讨[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 5(5): 1 549 - 1 556.(YAO Linlin, ZHANG Shishu, CUI Zhongtao, et al. Discussion on comprehensive advanced geological prediction technology in double-shield TBM construction[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 5(5): 1 549 - 1 556.(in Chinese))
- [32] 姚林林, 张世殊, 彭仕雄, 等. 双护盾 TBM 环境下 TRT 测试震源激发气锤[P]. 中国: ZL201920937075.0, 2019 - 12 - 31.(YAO Linlin, ZHANG Shishu, PENG Shixiong, et al. Pneumatic hammer for seismic source stimulation in trt testing under double-shield TBM environment[P]. China: ZL201920937075.0, 2019 - 12 - 31.(in Chinese))
- [33] PETRONIO L, POLETTI F. Seismic-while-drilling by using tunnel boring machine noise[J]. Geophysics, 2002, 67(6): 1 798 - 1 809.
- [34] NILOTE A, FANG G, LI E, et al. Real-time tunneling risk forecasting using vibrations from the working TBM[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2023, 139: 105213.
- [35] 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 Shucai, WANG Xin, GUO Weidong, et al. An advanced 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))
- [36] KAUS A, BOENING W. BEAM-Geoelectrical Ahead monitoring for TBM-Drives[J]. Geomechanik and Tunnelbau, 2008, 1(5): 442 - 449.
- [37] 李术才, 聂利超, 刘斌, 等. 多同源性阵列电阻率法隧道超前探测方法与物理模拟试验研究[J]. 地球物理学报, 2015, 58(4): 1 434 - 1 446.(LI Shucai, NIE Lichao, LIU Bin, et al. Advanced detection and physical model test based on multi-electrode sources array resistivity method in tunnel[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(4): 1 434 - 1 446.(in Chinese))
- [38] MA J J, MA C C, LI T B, et al. Real-time classification model for tunnel surrounding rocks based on high-resolution neural network and structure - optimizer hyperparameter optimization[J]. Computers and Geotechnics, 2024, 168: 106155.
- [39] LIU Q, WANG X, HUANG X, et al. Prediction model of rock mass

- class using classification and regression tree integrated AdaBoost algorithm based on TBM driving data[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020, 106: 103595.
- [40] QIU D, FU K, XUE Y, et al. TBM tunnel surrounding rock classification method and real-time identification model based on tunneling performance[J]. International Journal of Geomechanics, 2022, 22(6): 04022070.
- [41] WU Z, WEI R, CHU Z, 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.
- [42] ZHANG Q, LIU Z, TAN J. Prediction of geological conditions for a tunnel boring machine using big operational data[J]. Automation in Construction, 2019, 100: 73-83.
- [43] 朱梦琦, 朱合华, 王 昕, 等. 基于集成 CART 算法的 TBM 掘进参数与围岩等级预测[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(9): 1860-1871. (ZHU Mengqi, ZHU Hehua, WANG Xin, et al. Study on CART-based ensemble learning algorithms for predicting TBM tunneling parameters and classing surrounding rockmasses[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(9): 1860-1871. (in Chinese))
- [44] 李青松, 石豫川, 周春宏. 多元回归法在某水电站 TBM 施工隧洞围岩质量预测中的应用[J]. 长江科学院院报, 2012, 29(2): 41-45. (LI Qingsong, SHI Yuchuan, ZHOU Chunhong. Application of multiple regression method to the prediction of surrounding rockmass quality for TBM-excavated tunnels of hydropower station[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2012, 29(2): 41-45. (in Chinese))
- [45] GUI M W, SOGA K, BOLTON M D, et al. Instrumented borehole drilling for subsurface investigation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, 128(4): 283-291.
- [46] 王 琦, 高红科, 蒋振华, 等. 地下工程围岩数字钻探测试系统研发与应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(2): 301-310. (WANG Qi, GAO Hongke, JIANG Zhenhua, et al. Development and application of a surrounding rock digital drilling test system of underground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(2): 301-310. (in Chinese))
- [47] LI S J, XU H S, ZHENG M Z, et al. Evaluating the structure and mechanical properties of deep rock masses based on drilling process monitoring and borehole televiewer[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2023, 82(10): 395.
- [48] TEALE R. The concept of specific energy in rock drilling[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1965, 2(1): 57-73.
- [49] KARASAWA H, OHNO T, KOSUGI M, et al. Methods to estimate the rock strength and tooth wear while drilling with roller-bits—part 2: insert bits[J]. Journal of Energy Resources Technology, 2002, 124(3): 133-140.
- [50] HE M M, ZHANG Z Q, ZHU J W, et al. Correlation between the constant m_i of Hoek-Brown criterion and porosity of intact rock[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2022, 55: 923-936.
- [51] WANG X F, ZHANG M S, YUE Z Q. In-situ digital profiling of soil to rock strength from drilling process monitoring of 200 m deep drill hole in loess ground[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 142: 104739.
- [52] GAO H K, WANG Q, MA F L, et al. The identification method for rock strength and joint while drilling based on cutting energy density[J]. Journal of Central South University, 2024, 31(2): 621-635.
- [53] FLEGNER P, KAČUR J, DURDÁN M, et al. Processing a measured vibroacoustic signal for rock type recognition in rotary drilling technology[J]. Measurement, 2019, 134: 451-467.
- [54] ROSTAMI J, KAHRAMAN S, NAEIMIPOUR A, et al. Rock characterization while drilling and application of roof bolter drilling data for evaluation of ground conditions[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2015, 7(3): 273-281.
- [55] KAHRAMAN S, ROSTAMI J, NAEIMIPOUR A. Review of ground characterization by using instrumented drills for underground mining and construction[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49: 585-602.
- [56] ISRM. Rock characterization, testing and monitoring, ISRM suggested methods[M]. Oxford: Pergamon Press, 1981: 159-187.
- [57] 潘义辉, 闫冬飞. 结构面原位剪切试验在宗格鲁水电站中的应用[J]. 云南水力发电, 2019, 35(1): 38-43. (PAN Yihui, YAN Dongfei. Application of in-situ shear test of structural plane in Zonggelu hydropower station[J]. Yunnan Water Power, 2019, 35(1): 38-43. (in Chinese))
- [58] FRANKLIN J A, PELLIS P, MCLACHLIN D, 等. 测定点荷载强度的建议方法(1985 年修订, 取代 1972 年版本)[J]. 岩石力学与工程学报, 1986, (1): 81-92. (FRANKLIN J A, PELLIS P, MCLACHLIN D, et al. Suggested Method for Determining Point Load Strength (Revised 1985, Replaces of 1972 Version)[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1986, (1): 81-92. (in Chinese))
- [59] XIE W Q, ZHANG X P, LIU Q S, et al. Experimental investigation

- of rock strength using indentation test and point load test[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 139(1): 104647.
- [60] BCH A, FHC B. ISRM Suggested Methods for rock stress estimation-Part 3: hydraulic fracturing(HF) and/or hydraulic testing of pre-existing fractures(HTPF)[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2003, 40(7/8): 1 011 - 1 020.
- [61] CORNET F H, VALETTE B. In situ stress determination from hydraulic injection test data[J]. Journal of Geophysical Research Solid Earth, 1984, 89: 11 527 - 11 537.
- [62] TE KAMP L. Hydrofrac stress profile to 9 km at the German KTB site[C]// Proceedings of the Workshop on Rock Stresses in the North Sea. [S. l.]: [s. n.], 1995: 19 - 22.
- [63] 李邵军, 郑民总. 基于光纤光栅的深部硬岩隧洞三维扰动应力测试系统研制及工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(2): 261 - 274.(LI Shaojun, ZHENG Minzong. Development and engineering application of three-dimensional disturbed stress measurement system for deep hard rock engineering based on fiber bragg grating[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(2): 261 - 274.(in Chinese))
- [64] 刘允芳, 朱杰兵, 刘元坤. 空心包体式钻孔三向应变计地应力测量的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2001, 20(4): 448 - 453.(LIU Yunfang, ZHU Jiebing, LIU Yuankun. Research on hollow inclusion triaxial strain gauge for geostress measurement[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2001, 20(4): 448 - 453.(in Chinese))
- [65] 王益腾. 基于钻孔形态的地应力测试方法及地应力场反演研究[博士学位论文][D]. 北京: 中国科学院大学, 2019.(WANG Yiteng. Research on in-situ stress measurement method based on borehole morphology and inversion of stress field[Ph. D. Thesis][D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2019.(in Chinese))
- [66] 葛修润, 侯明勋. 钻孔局部壁面应力解除法(BWSRM)的原理及其在锦屏二级水电站工程中的初步应用[J]. 中国科学: 技术科学, 2012, 42(4): 10.(GE Xiurun, HOU Mingxun. Principle of in-situ 3D rock stress measurement with borehole wall stress relief method and its preliminary applications to determination of in-situ rock stress orientation and magnitude in Jinping hydropower station[J]. Scientia Sinica(Technologica), 2012, 42(4): 10.(in Chinese))
- [67] FUNATO A, ITO T. Laboratory verification of the diametrical core deformation analysis(DCDA) developed for in-situ rock stress measurements[J]. Shigen-to-Sozai, 2014, 129(8/9): 577 - 584.
- [68] BARTON N. Some new Q -value correlations to assist in site characterization and tunnel design[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, 39(2): 185 - 216.
- [69] 李维树, 周火明, 陈 华, 等. 构皮滩水电站高拱坝建基面卸荷岩体变形参数研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(7): 1 333 - 1 338.(LI Weishu, ZHOU Huoming, CHEN Hua, et al. Study of unloading rock mass deformation parameters for high arch dam foundation base of Goupitan hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(7): 1 333 - 1 338.(in Chinese))
- [70] AGLIARDI F, SAPIGNI M, CROSTA G B. Rock mass characterization by high-resolution sonic and GSI borehole logging[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49: 4 303 - 4 318.
- [71] 闫长斌, 徐国元. 对 Hoek-Brown 公式的改进及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(22): 4 030 - 4 035.(YAN Changbin, XU Guoyuan. Modification of Hoek-Brown expressions and its application to engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(22): 4 030 - 4 035.(in Chinese))
- [72] 杨静熙, 黄书岭, 刘忠绪. 锦屏一级水电站工程岩体对穿声波与单孔声波关联性探讨[J]. 岩土力学, 2020, 41(4): 1 347 - 1 356.(YANG Jingxi, HUANG Shuling, LIU Zhongxu, et al. Study on the relationship between cross-hole sonic wave and single-hole sonic wave of rock mass at Jinping I hydropower station[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(4): 1 347 - 1 356.(in Chinese))
- [73] AL-SIT W, AL-NUAIMY W, MARELLI M, et al. Visual texture for automated characterisation of geological features in borehole televiewer imagery[J]. Journal of Applied Geophysics, 2015, 119: 139 - 146.
- [74] LI S J, FENG X T, WANG C Y, et al. ISRM suggested method for rock fractures observations using a borehole digital optical televiewer[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2013, 46(3): 635 - 644.
- [75] 李术才, 刘 斌, 孙怀凤, 等. 隧道施工超前地质预报研究现状及发展趋势[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(6): 1 090 - 1 113.(LI Shucai, LIU Bin, SUN Huaifeng, et al. State of art and trends of advanced geological prediction in tunnel construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(6): 1 090 - 1 113.(in Chinese))
- [76] EBIHARA S, SATO M, NIITSUMA H. Super-resolution of coherent targets by a directional borehole radar[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000, 38(4): 1 725 - 1 732.
- [77] 刘四新, 王文天, 傅 磊, 等. 基于 BS-MUSIC 的定向钻孔雷达三维成像算法[J]. 地球物理学报, 2017, 60(12): 10.(LIU Sixin, WANG Wentian, FU Lei, et al. 3D borehole radar imaging method based on BS-MUSIC[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2017,

- 60(12): 10.(in Chinese))
- [78] 申艳军, 徐光黎, 宋胜武, 等. 高地应力区水电工程围岩分类法系统研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(11): 2 267 – 2 275. (SHEN Yanjun, XU Guangli, SONG Shengwu, et al. A classification method of surrounding rock mass in hydropower project in high geostress area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(11): 2 267 – 2 275.(in Chinese))
- [79] 刘泉声, 许锡昌. 温度作用下脆性岩石的损伤分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(4): 408 – 411.(LIU Quansheng, XU Xichang. Damage analysis of brittle rock at high temperature[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(4): 408 – 411.(in Chinese))
- [80] 陈国庆, 李天斌, 张 岩, 等. 花岗岩隧道脆性破坏的温度效应研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(12): 3 513 – 3 519.(CHEN Guoqing, LI Tianbin, ZHANG Yan, et al. Thermal effect of brittle failure for granite tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(12): 3 513 – 3 519. (in Chinese))
- [81] 申艳军, 徐光黎, 魏志云. 大跨度地下洞室集成化围岩分类体系构建及可视化程序实现[J]. 现代隧道技术, 2014, 51(4): 28 – 38. (SHEN Yanjun, XU Guangli, WEI Zhiyun. Establishment and visualization of an integrated surrounding-rock classification system for large-span underground caverns[J]. Modern Tunneling Technology, 2014, 51(4): 28 – 38.(in Chinese))
- [82] 马显东, 周 剑, 张路青, 等. 强震区公路沿线崩塌危岩体特征提取及失稳分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(增 1): 2 901 – 2 914. (MA Xiandong, ZHOU Jian, ZHANG Luqing, et al. Feature extraction and instability analysis of dangerous rock mass along highway in meizoseismal areas[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 41(Supp.1): 2 901 – 2 914.(in Chinese))
- [83] 许振浩, 邵瑞琦, 林 鹏, 等. 隧道不良地质识别: 方法、现状及智能化发展方向[J]. 地球学报, 2024, 45(1): 5 – 24.(XU Zhenhao, SHAO Ruiqi, LIN Peng, et al. Adverse geology identification in tunnel: method, research status and intelligent development direction[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2024, 45(1): 5 – 24.(in Chinese))
- [84] BARTON N. Some new Q-value correlations to assist in site characterisation and tunnel design[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, 39(2): 185 – 216.
- [85] YANG J. Estimation of rock mass properties in excavation damage zones of rock slopes based on the Hoek-Brown criterion and acoustic testing[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2020, 126: 104192.
- [86] HOEK E, WOOD D, SHAH S. A modified Hoek-Brown failure criterion for jointed rock masses[C]// Proceedings of the International ISRM Symposium Proceedings of the International ISRM Symposium. Chester, UK: Thomas Telford Publishing, 1992: 209 – 214.
- [87] HOEK E, BROWN E T. The Hoek-Brown failure criterion-a 1998 update[J]. Journal of Heuristics, 1988, 16(2): 167 – 188.
- [88] HOEK E, BROWN E T. Practical estimates of rock mass strength[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34(8): 1 165 – 1 186.
- [89] 夏开宗, 刘夏临, 林英书, 等. 基于岩体波速的地下洞室围岩损伤区岩体力学参数取值方法及工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(10): 2 414 – 2 429.(XIA Kaizong, LIU Xialin, LIN Yingshu, et al. A method for determining mechanical parameter values of rock mass in the damage zone of surrounding rocks of underground caverns based on wave velocities of rock mass and its engineering application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(10): 2 414 – 2 429.(in Chinese))
- [90] 冯夏庭, 杨成祥. 深部工程硬岩力学[M]. 北京: 科学出版社, 2023: 447 – 455.(FENG Xiating, YANG Chengxiang. Hard rock mechanics in deep engineering[M]. Beijing: Science Press, 2023: 447 – 455.(in Chinese))