

# TBM在水利工程中的应用进展及发展方向

赵宇飞<sup>1</sup>, 张云旆<sup>1</sup>, 杨建喜<sup>2</sup>, 叶 明<sup>3</sup>, 徐 全<sup>4</sup>

(1. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 100048, 北京;  
2. 广东粤海水务股份有限公司, 518018, 深圳; 3. 中国水利水电第六工程局有限公司, 110169, 沈阳;  
4. 雅江清洁能源科学技术研究(北京)有限公司, 100080, 北京)

**摘要:** TBM 广泛应用于水利、交通、采矿等相关行业隧洞/隧道工程中。得益于高度的机械化和信息化集成, 相较于传统钻爆法施工, 在适宜掘进的围岩(中硬岩)条件下, 采用 TBM 工法能够保障施工安全、高效。近年来水工隧洞工程呈现出距离长、洞径大、埋深大等特点, 建设要求逐渐提高, 更宜采用 TBM 法施工。国产 TBM 制造水平的提高使得装备的整体性能、关键部件制造能力和智能化水平得到了充分提升, 增强了 TBM 对于复杂地质条件的适应能力。系统梳理了 TBM 技术在我国水利工程中的应用进展与未来方向, 重点围绕三个方面展开: 一是总结引汉济渭、滇中引水等标志性工程中 TBM 应对复杂地质的实践经验, 梳理我国水工 TBM 隧洞工程的发展脉络; 二是分析新型装备、新材料与新技术在提升 TBM 适应性方面的创新突破, 总结提炼核心技术和瓶颈问题; 三是探讨智能化、信息化技术在实现 TBM 自主决策、状态自感知与绿色施工中的前沿应用, 展望大数据和人工智能在水利工程发展中的重要性。研究旨在为我国水利工程 TBM 技术发展与实践提供体系化参考, 推动行业技术迭代与创新能力持续提升。

**关键词:** TBM; 水利工程; 隧洞工程; 施工; 新装备; 新材料; 新技术; 复杂地质; 智能化

**Application and future development of TBM in water project construction//**ZHAO Yufei, ZHANG Yunpei, YANG Jianxi, YE Ming, XU Quan

**Abstract:** The Tunnel Boring Machine (TBM) has been widely used in tunnel construction for water resources, transportation, and mining projects. Owing to its high degree of mechanization and digital integration, the TBM method ensures safer and more efficient construction than the conventional drill-and-blast method under suitable geological conditions, particularly in medium-hard rock. In recent years, water conveyance and hydraulic tunnel projects have tended to feature longer lengths, larger diameters, and greater burial depths, with increasingly stringent construction requirements, making TBM construction more preferable. Improvements in domestic TBM manufacturing have significantly enhanced overall performance, key component fabrication capabilities, and the level of intelligent operation, thereby improving adaptability to complex geological conditions. This paper systematically reviews the application progress and future directions of TBM technology in China's water projects, focusing on three aspects: first, summarizing practical experiences in representative projects, such as the Hanjiang-to-Weihe River Diversion Project and the Central Yunnan Water Diversion Project, in addressing complex geological conditions, and outlining the development trajectory of TBM-based hydraulic tunnel construction; second, analyzing innovative breakthroughs in new equipment, new materials, and new technologies that enhance TBM adaptability, and identifying core technologies and persistent bottlenecks; third,

收稿日期:2025-09-22 修回日期:2025-10-27

作者简介:赵宇飞, 岩土所副所长, 正高级工程师, 主要从事岩土工程信息化方面的研究。

通信作者:张云旆, 博士, 主要从事岩土工程智能化方面的研究。E-mail: zhangyp@iwhr.com

基金项目:中国电力建设股份有限公司重点科技项目(DJ-HXGG-2023-5)。

exploring frontier applications of intelligent and digital technologies for enabling autonomous decision-making, self-sensing, and green construction, and highlighting the significance of big data and artificial intelligence in future water project development. The study aims to provide a systematic reference for the advancement and practical application of TBM technology in China's water projects, promoting continuous technological iteration and innovation across the sector.

**Keywords:** TBM; water projects; tunnel engineering; construction; new equipment; new materials; new technologies; complex geology; intelligent

中图分类号: TV53 文献标识码: A 文章编号: 1000-1123(2025)21-0056-09

DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2025.21.009

水资源时空分布不均是我国经济社会发展面临的重大挑战,跨流域调水工程是解决这一问题的有效手段。随着国家水网建设全面推进,长距离输水隧洞逐渐成为水利基础设施的关键组成部分。在长大隧洞建设中,传统钻爆法施工存在效率低、安全风险大、环境影响突出等局限性,难以满足现代水利工程建设需要。全断面岩石掘进机(Tunnel Boring Machine, TBM)作为一种集掘进、支护、出渣于一体的大型地下空间施工装备,自20世纪50年代投入使用以来,经历了半个世纪的技术发展与革新,目前已成为国内外长距离隧洞工程的首选施工方案,尤其适用于地质条件复杂、埋深大、距离长的水工隧洞。

我国TBM技术虽然起步较晚,但得益于长期以来大量工程的实践经验积累和技术储备,通过引进、消化、吸收和再创新,已实现了从“跟跑”到“并跑”甚至“领跑”的跨越式发展。20世纪80—90年代,以天生桥二级水电站和引大入秦等工程为代表,我国水利行业开始成规模应用并推广TBM工法,历经30余年发展,整体应用规模、施工能力和装备性能得到了全方位提升。新时期,在国家水网建设和西南能源开发等背景下,水利工程将面临更复杂的地质条件和更严格的设计要求。至此,围绕重大工程挑战、复杂地质应对、新型装备材料和智能信息发展等方向,深入研究TBM在水利工程中的应用,展望TBM未来发展方向,对于推动我国水利高质量发展具有重要意义。

## 一、TBM技术基础

TBM是一种实现隧洞/隧道全断面一次成型的大型现代化施工装备。根据支护方式和工作原理的不同,TBM主要分为敞开式、单护盾式、双护盾式和复合式等类型。敞开式TBM适用于岩体较完整的硬岩地层,开挖后需及时进行支护;单护盾式TBM适用于软硬岩交错的地层,采用护盾结构支撑洞壁;双护盾式TBM则兼具单护盾式和敞开式特点,既能适应不稳定围岩,又能在稳定岩层中高效掘进;复合式TBM是针对极端复杂地质条件开发的多功能组合式掘进机。在水利工程中,根据输水隧洞的使用功能、地质条件和施工要求,选择合适的TBM至关重要(见表1)。

我国从20世纪80年代开始引进TBM技术用于水电工程隧道施工。进入21世纪后,随着南水北调等重大工程实施,TBM技术在我国水利工程中的应用进入快速发展期。特别是近10年来,我国TBM技术取得了显著进步:①装备国产化率不断提高,主要厂商已能自主设计制造各类TBM;②工程应用规模持续扩大,TBM掘进里程不断刷新纪录;③技术创新能力显著增强,在复杂地质条件下TBM施工技术达到国际先进水平。我国自主研发的TBM已成功应用于引江补汉、梅山灌区等多项重大水利工程,隧洞最大直径达到12 m级,最大埋深超过2000 m。

TBM技术在水利工程中的发展不仅提升了施工

表1 水利工程中常见TBM类型及其适用条件

类型	适用地质条件	主要优点	局限性	应用案例
敞开式TBM	稳定岩层,石英闪长岩、花岗岩等硬岩	掘进效率高,成本相对较低	对不良地质适应性差	滇中引水工程
单护盾式TBM	软岩与硬岩交错地层	结构相对简单	掘进效率较低	引江补汉工程
双护盾式TBM	不稳定岩层,断层破碎带	适应性较强,安全性好	设备复杂,成本高	梅山灌区工程
复合式TBM	极复杂地质,多种地层组合	适应性极强,功能集成	设备昂贵,维护复杂	珠江三角洲水资源配置工程

效率,也推动了相关产业技术进步。目前我国已形成完整的TBM研发制造、施工应用、运维服务产业链,将为后续的国家水网工程建设提供有力支撑。

## 二、我国TBM应用进展

### 1. 我国重大水利工程中的TBM应用及突破

据不完全统计,2000年以后207项采用TBM施工的隧洞/隧道工程中,水工隧洞共计134项,占比64.7%。在国家水网建设推动下,水工隧洞建设也将呈现出大直径、大埋深和长距离特点,采用TBM法修建水工隧洞成为行业首选。

引大入秦工程是我国最早采用TBM施工的水利工程之一,其主要任务是将黄河水引入秦岭北麓地区,以改善当地供水条件。引大入秦工程开创我国大型水利工程全面采用TBM施工先河,盘道岭隧道采用了意大利CMC公司生产的TBM,该机型在当时世界上仅有3台;30A、38号隧洞于1991年1月开始施工、1992年8月贯通,隧洞长度16.649 km,采用美国罗宾斯生产的双护盾TBM,开挖直径为5.54 m,其中38号隧洞还进行了国产第一代SJ550型TBM的掘进试验。该工程在机械化施工、TBM施工技术体系构建、国际先进技术引入与本土化实践等方面实现了历史性突破。

山西万家寨引黄入晋工程是山西省水利现代化的重要标志性工程,是国内首次大规模应用TBM技术的大型调水工程,至今已累计向太原、大同、朔州等地区供水约50亿m<sup>3</sup>,同时向永定河生态补水近2亿m<sup>3</sup>。该工程始建于1994年,全线452.4 km,采用多台TBM施工,TBM供应商为美国罗宾斯和法国NFM,开挖直径为4.82~6.13 m。工程沿线地形复杂,需穿越河谷、山地及断层破碎带,施工难度较大。工程实践中形成了TBM快速掘进隧洞设计和豆砾石回填灌浆方法,章跃林等提出了两种施工方案,一是“预制管片衬砌+豆砾石填充”,适配地质均一、快速掘进场景;二是“豆砾石回填+灌浆”,适用于复杂地质围岩加固,并相应研发预制钢筋混凝土管片衬砌技术,为后续工程积累了宝贵经验。该工程的实践证明应用TBM在复杂地质条件下进行长距离隧洞施工,具有可行性、高效性和经济性。

进入21世纪,水利工程建设加快推进,一大批工程开工。大量工程的实践应用,培养出一大批具有丰富施工经验的一线技术工作者和管理人员。

引汉济渭工程是克服极端地质条件施工的代表性工程,该工程于2012年开工,旨在将汉江水引入渭河

流域。工程隧洞全长约81.8 km,穿越秦岭山脉,面临高地应力、断层破碎带及超硬岩段等复杂地质条件。工程分岭南段和岭北段,TBM最大直径达到8.05 m。施工中,参建单位克服大埋深(超2000 m)、超硬岩(局部岩石抗压强度超过275 MPa)和强岩爆(岩爆事件超千次)等挑战,同时应用热能、水力、劈裂等多种破岩技术,使用基于微震监测的岩爆预警技术,充分提升TBM在极硬岩段掘进效率和强岩爆段的掘进安全性,为深埋高地应力隧洞施工积累了宝贵经验。

吉林省中部城市引松供水工程是又一项标志性重大引调水工程。在该工程中,国产TBM设备的制造能力和施工水平得到了实践检验,此后国产TBM开始逐渐占据国内市场。工程成功应用了我国首台具有完全自主知识产权的大直径敞开式TBM“长春号”,打破了国外技术垄断;工程将科研和工程实践相结合,首次在国内大规模应用TBM信息化监测与智能化分析技术,实现掘进参数优化、支护调整及风险预警闭环,为国产TBM性能验证和智能化施工积累了宝贵经验;工程创造了当时多项国内纪录,包括月进尺1209.8 m,平均月进尺超过750 m,连续月进尺突破920 m,最高日进尺86.5 m等。

随着国家水网工程建设的持续推进,新时期引调水工程更多呈现出大直径、长距离、高埋深和集群施工特点,如新疆某供水工程全线采用超过20台TBM,隧洞总长超过500 km,最长单洞线路总长接近300 km,超过10家施工单位同时施工,是目前国内规模最大的TBM集群工程。

滇中引水工程是又一项地质条件极为复杂、施工难度极大的重大引调水工程。该工程香炉山隧洞于2022年开始TBM施工,采用2台直径9.8 m的敞开式TBM同时对打,创造了当时引调水工程最大直径TBM的行业纪录。香炉山隧洞穿越断层破碎带、软硬岩互层及高地应力区,地质条件复杂,施工面临岩体强度变化大、围岩急剧变形和突涌水(泥)等风险。为克服上述问题,参建各单位经过长期艰苦奋斗,采用超前地质预报和强化即时支护相结合方式,逐步突破困难洞段。截至2025年6月底,一期输水工程已累计贯通618.7 km,占全线总长的93.2%。该工程也探索了科学决策支撑工程建设的新范式,由云南省滇中引水工程建设管理局牵头成立了由院士领衔的专家组,汇聚了国内TBM领域顶尖专家学者,通过专题讨论、针对研究,为工程建设提供服务支撑。

环北部湾广东水资源配置工程是采用信息化管理的代表性引调水工程,该工程于2023年进入全线施工,是国家水网的重要组成部分。隧洞线路总长接近500 km,采用13台TBM施工,截至2025年9月已经累计完成掘进50 km。为提升工程管控质量,业主单位基于数字孪生、物联网、大数据及云计算等技术构建质量检测智慧监管系统,通过实时双向数据交互和传输,为数据中心提供试验检测的实施数据、检测报告、表单数据、工程数据及不合格闭合情况数据。通过该系统可实现全流程试验检测管理,包括移动端取样、RFID芯片或二维码标记样品、流转过程监控、养护过程监控、临检漏检提醒、伺服式试验机集成及试验结果自动采集、试验成果报告自动生成、试验结果系统分析,实现从生产到成品全过程监控,确保检测数据的真实性、唯一性和可追溯性,提升试验检测工作效率和工作质量。

引江补汉工程是我国在建长距离有压引调水隧洞中单洞长度最长、洞径最大、综合难度最高的工程项目之一。2025年以来,引江补汉工程多台TBM陆续始发,创造了多项TBM新纪录,包括国产最大直径敞开式TBM“江汉领航号”,开挖直径11.93 m;国内水利工程最大直径单护盾式TBM“江汉开拓号”,开挖直径12.23 m;国内在建隧洞工程中最大直径双护盾式TBM“江汉平安号”,开挖直径11.93 m。超大直径施工对于设备性能提出了更高要求,制造商对此进行了针对性的设计,“江汉新石器号”TBM采用刀具小间距布置、大范围扩挖的刀盘设计方法,以提升超大直径TBM应对不良地质条件的能力;“江汉龙安号”采用了双模式设计,能够针对不同地质条件切换土压平衡模式和单护盾模式,为刀盘提供稳定的支撑,实现高效破岩;“江汉武当号”装备了扭矩倍增脱困系统,通过在主电机和减速机之间增加双速减速机,充分提升脱困扭矩。该工程将充分检验国产大直径TBM装备性能,也将进一步推动我国超大直径TBM施工能力提升和技术发展。

综上,经过30余年发展,我国水工隧洞TBM的制造水平和施工水平均已处于国际领先地位,一大批重大水利工程的建设和完工推动了国家骨干水网建设和完善,有效促进了水资源优化配置、水安全保障、区域协调发展,对经济社会可持续发展具有深远意义。

## 2.TBM相关新装备、新材料、新技术应用

### (1)新型破岩技术

长期以来提升破岩效率一直是学术界和工程界的研究重点和难点。近年来针对硬岩地层中滚刀与截齿

破岩效率低、刀具磨损严重问题,在传统破岩模式基础上结合新型破岩方式成为了研究热点。诸如水力联合破岩,即通过高压水射流预先切槽,辅助机械滚刀破碎岩石,减少滚刀磨损,提高破岩效率;或利用激光辅助破岩,通过高能激光束预处理岩石,弱化其强度。比较具有代表性的是由中国科学院武汉岩土力学所周辉团队提出的“预切槽+滚刀”联合破岩模式,通过高压水射流切槽,优化裂纹扩展路径,提升破岩效率,并减小刀具载荷。需要注意的是,发挥高压水射流的破岩效果需保障瞬时水压超过150 MPa,同时射流喷嘴需超前于滚刀刀刃50~80 mm布置,以实现在滚刀压入岩石前,先行在岩体中切割出初始导向槽。试验表明该技术可降低44%~53%的破岩力,并揭示了临界切槽深度对破岩效果的调控作用。

### (2)装备制造技术

近年来国产TBM在核心部件制造、生产和维修保养等方面有了长足技术进步。以主轴承为例。主轴承是连接刀盘与主驱动系统的核心承载部件,用于支撑并传递掘进过程中产生的巨大轴向推力、径向力和倾覆力矩,决定了TBM的施工状态和工作能力,故TBM施工对主轴承的质量要求极高。长期以来,尽管国产TBM已经占据了大部分国内市场,但是主轴承仍然依赖国外进口。2023年,中国铁建重工集团股份有限公司成功实现了16 m级超大直径盾构机主轴承的国产化,为TBM主轴承的技术攻关奠定了坚实基础。在刀盘刀具设计与布局优化、快速换刀、多模式出渣、可变径技术和后支撑结构优化等其他方面,也实现了不同程度的创新。

### (3)新型施工材料

TBM施工需要消耗大量材料,主要以刀具材料和支护材料为主,其中刀具的性能一定程度上决定了破岩效率,刀具磨损率越低,换刀周期越长。决定刀具磨损率的因素包括围岩条件和刀具本身材质。以刀具材料为例,选用原则为高耐磨性和抗冲击性,故通常以高性能合金为主,如钨钴合金和高碳高铬钢。近年来,纳米涂层技术逐渐应用到刀具制造领域,通过在刀具表面形成微米级保护层提高抗腐蚀性、耐磨性和热稳定性,以适应高地温、超硬岩等复杂地质条件。具体实现方式为在刀圈基体(如H13钢)上制备金属基陶瓷复合涂层,涂层材料体系主要包括铁基、钴基及镍基自熔性合金,并通过添加WC、TiC等硬质颗粒作为增强相;镍基WC复合涂层因综合性能优异而应用最广。在制

备工艺上,当前通过激光熔覆技术来实现涂层与基体的冶金结合,而超音速火焰喷涂则可用于制备高结合强度的涂层。然而,这项技术仍面临涂层高硬度与韧性难以兼顾、制备过程易产生残余应力,以及缺乏专用粉末和真实工况验证等挑战。其他TBM施工材料,如注浆材料(豆砾石等)、新型支护材料(高强钢材)等,也是研究的重点方向。

### (4) 抽水蓄能电站TBM施工技术

2020年以来,为进一步开发和利用清洁能源,许多抽水蓄能电站项目上马。抽水蓄能电站隧洞长度虽然较短但有坡度,采用TBM工法进行抽水蓄能电站引水隧洞和斜井的施工成为新的尝试。相较于平硐施工,抽水蓄能隧洞施工围岩地质条件较好,但由于TBM自重巨大,往往需要针对性的装备设计与施工组织。中国水利水电第六工程局有限公司施工的洛宁抽水蓄能电站斜井工程,采用了由中铁工程装备集团有限公司生产的“永宁号”TBM。“永宁号”整机全长121 m,总重1550 t,开挖直径达7.23 m,是首台国产大直径大倾角斜井硬岩掘进机。为了克服大角度逆坡掘进难题,“永宁号”TBM通过防滑制动与仿生支撑装置保证掘进稳定,结合溜渣槽、连续皮带机与喷淋系统实现高效排渣,显著提升了施工安全性与效率。在整机设计中,针对TBM下溜、碴料堵渣、掘进材料输送及液压设备调节等关键问题进行了优化改进。TBM前半部分设置2组外凯和2组ABS支撑装置,用于掘进过程中稳定岩壁,4套组件相互独立,既提供掘进所需推力,又产生足够摩擦力以确保整机在掘进和换步作业中保持稳定,防止下溜现象发生。

### (5) 超前地质预报技术

TBM工程的超前地质预报技术通常以物探和钻探为主。传统物探手段受限于作业空间、施工环境,且具有多解性,探测精度随探测距离增长而衰减,在含水体探测方面尤为明显。钻探技术施作空间、时间和经济成本较大,全洞段开展的难度较高。故而,有学者提出通过整合多源数据实现对异常地质的提前识别,为施工决策提供科学依据。中国科学院王伟研究了基于弹性波反射原理的DOSO双源双程重叠观测技术,通过在隧道底部设置震源激发P波与S波,并利用布置于管片及超前钻孔内的三分量检波器接收反射信号,对掌子面前方地质体进行高分辨率成像,技术流程涵盖初至时间拾取、拉东变换反射波提取、极化分析、速度分析及偏移成像等步骤,并结合逆时偏移和全波形反

演以提高异常体识别精度,系统集成三维数值模拟与可视化模块,可直观展现前方地质结构,实现从定性识别向定量分析的转变。工程应用表明,该方法探测距离可达约100 m,能够有效识别断层、破碎带及富水区,为复杂地质条件下的TBM掘进安全提供了重要技术保障。此外,中铁工程装备集团有限公司研究的基于TBM施工振动作为激发源的新型地质预报方法,中国水利水电科学研究院研究的数字化TBM超前钻探方法等,均在探测手段、数据利用等方面进行了探索。

## 3. 复杂地质条件应对措施研究

### (1) 应对围岩大变形

围岩大变形主要发生在深埋软岩隧洞中,在高地应力作用下,软岩的蠕变效应加剧,进而影响施工安全和围岩稳定,如滇中引水香炉山隧洞因围岩大变形引起TBM卡机,造成了工期延误和投资增加。同济大学张锋团队系统探讨了高地应力软岩隧道大变形的发生机理,提出优化支护结构、加强施工控制等应对措施。长江科学院丁秀丽团队结合现场监测数据和数值模拟总结了软岩变形规律,提出了分步开挖、临时支护加固及超前支护设计等控制方案。研究表明,初期支护采用高延性喷射混凝土、可缩式钢拱架与压锚杆相互结合的方式,吸收围岩变形能量,并防止初期结构刚性约束过强导致早期破坏;在二衬施工阶段,采用高强度混凝土与钢筋网联合支护,并通过预留变形量及设置滑移连接件实现二次让压,确保衬砌在持续变形过程中保持整体稳定。对于高地应力或软岩地层,还可以辅以超前支护、长锚索及管棚支护等措施,提高掌子面稳定性,实现围岩与支护的协调变形,从而有效控制大变形隧洞的稳定性问题。

### (2) 应对断层破碎带

断层破碎带是TBM施工面临的关键风险之一。长江勘测规划设计研究有限责任公司张传健基于滇中引水香炉山隧洞的施工实践,总结得出断层破碎带区域岩体破碎、含水量高,容易引发掘进阻力增大、刀具磨损严重、围岩大变形及突涌水(泥)等问题。针对断层破碎带施工风险,该工程实践中采用超前地质预报提前识别潜在断层带及软弱地段,结合分步开挖、超前支护、临时支护及多级排水体系控制围岩变形和水害。同时,建立实时监测与智能调控系统,针对掘进参数、支护状态和围岩变形情况进行动态调整,提高断层破碎带隧道施工的安全性与连续掘进能力。研究表明,通过在掘进前实施超前固结灌浆或管棚支护,可提高

破碎围岩整体性与承载力；掘进过程中采用可让压钢拱架、锚杆和高延性喷射混凝土组合支护，可控制围岩收敛与应力集中；同时在拱底和腰线部位加密锚固，可防止底鼓及机头下沉。掘进完成后及时施作二衬结构，使初期支护与二衬协同承载，形成围岩-支护协调变形稳定体系，从而实现断层破碎带段的安全可控掘进。

### （3）应对突涌水（泥）

突涌水（泥）是TBM施工中极为严重的常见风险之一，常出现在富水断层带、破碎带及高压含水层中，极易引发掌子面失稳、设备被淹及长时间停机等严重后果。中铁十八局集团有限公司齐梦学等通过分析典型TBM工程案例，发现突涌水（泥）具有突发性强、涌水量大、持续时间长的特点，往往伴随大量泥石进入，导致排渣系统受阻，甚至诱发塌方灾害。防治措施应遵循“超前预报、分级应对、动态处置”原则：一方面，需通过超前钻探、地质雷达和物探等多手段识别含水构造，建立风险预警机制；另一方面，采用超前帷幕注浆、加固破碎岩体、分区减压排水等措施可降低水压、封堵渗透通道；同时，在突涌水（泥）发生后，应通过快速封堵、应急排水与掘进参数调整，减少灾害扩展范围。此外，面临突涌水（泥），可通过在掌子面前方超前钻孔注浆形成止水帷幕，利用化学浆液或高分子材料加固破碎围岩并封堵渗水通道；对洞壁渗水采用防水板与引流系统，将水流集中至集水池统一抽排；在高压突水地段辅以管棚或小导管注浆形成伞状防水层，提高掌子面抗渗能力。配合实时监测与支护参数调整，该技术可有效控制突水范围，确保TBM掘进安全与施工稳定。

### （4）应对岩爆

岩爆是TBM施工中极具威胁性的地质灾害之一，尤其在高地应力、硬岩及软硬岩互层区表现突出。近年来，国内外在岩爆监测、预警与防控技术方面取得了显著进展。微震监测技术被广泛应用，通过实时记录围岩微震活动，可识别潜在岩爆发生区域及等级，为支护设计及施工参数调整提供科学依据。针对岩爆防控，研究提出了主动与被动联合策略：主动措施包括超前钻孔应力释放、超前小孔爆破、先导洞施工、钻孔注水及超前锚杆加固；被动措施包括喷锚网、钢支撑及钢筋网等围岩加固手段。在深埋隧洞工程实践中，利用这些措施结合掘进速度、支护模式及施工节奏对岩爆防控进行优化，形成轻微、中等、强烈三个等级的岩爆风险分级及“掘速控制-风险控制-时空控制-分级控制”的防控准则，实现了预警、施工与支护的闭环管

理。深埋隧洞岩爆支护技术是防控灾害的核心，可分为主动和被动两类，旨在通过加固围岩提高抗冲击能力。主动支护如超前锚杆和预应力锚杆，在开挖前实施，通过应力释放和预加固降低岩爆风险，适用于高风险洞段；被动支护如喷锚支护、钢支撑和挂网防护，在开挖后发挥作用，其中喷锚支护结合混凝土和锚杆形成承载体系，钢支撑提供刚性支持，而柔性钢丝网等挂网措施能有效吸收动能。

## 4. 信息化和智能化发展应用

### （1）智能选型方面

传统TBM选型方法往往依赖经验判断，存在较强主观性、局限性，难以适应复杂地质条件。如何充分利用初勘地质资料，引入人工智能方法，对专家知识进行补充，是新的研究方向。武汉大学刘泉声团队提出了基于数据驱动的TBM智能选型方法，将设备选型问题转化为分类预测任务，基于沿线地质资料及施工先验信息，利用机器学习模型实现TBM选型推荐。具体来说，是将施工案例数据驱动作为选型主要方法，将复杂、模糊的TBM选型问题转换为简单、明确的TBM分类问题，有效提升了选型的科学性和可解释性。研究收集了敞开式TBM案例55个、单护盾式TBM案例21个、双护盾式TBM案例41个，收集数据包括隧道沿线各级围岩占比、隧道直径、平均埋深、隧道用途、月进尺等，利用多重插补算法填补案例中缺失数据，并利用SMOTE-NC算法对不平衡数据集进行处理，从而增强数据集。其中LightGBM模型表现最佳，测试集选型精度高达94.4%。

### （2）智能感知方面

围岩地质条件始终是TBM过程感知的主要对象，智能感知则是结合多源感知信息，充分利用已建工程数据，对围岩地质条件进行评估和预测。中国水利水电科学研究院张云旆基于3个不同直径和地质条件的TBM施工隧道构建了跨工程大数据库，通过特征工程与机器学习模型实现不良岩体的跨工程识别与预测，开发了一套跨工程智能感知方法，目的是通过机器学习提升岩体质量预测泛化能力。该方法引入隧道直径和盘形刀数量作为关键输入参数，与FPI和TPI结合，形成扩展特征向量（包括TPI、a、b、R<sup>2</sup>T、R<sup>2</sup>F、D、N），以有效克服不同项目间机械和地质条件的差异。数据预处理阶段采用循环划分和状态函数过滤异常值，确保数据质量；机器学习方面以随机森林算法为主算法，将岩体质量简化为二分类问题，即分为稳定岩体（I~III级）与不稳定岩

体(IV~V级),并辅以支持向量机SVM等进行对比验证。训练过程通过10折交叉验证优化并利用ROC曲线调整概率阈值,从而显著提升了对不稳定岩体的识别精度。验证结果表明,混合学习模型的AUC值超过0.85,F1分数接近0.75,证实了该方法在跨项目场景下的有效泛化能力,为TBM在未知地质条件下的实时感知提供了可靠基础。特征参数正态分布检验支持了输入数据的可靠性;而三维聚类分析进一步揭示了不同岩体等级的参数分离趋势,增强了模型的可解释性。北京交通大学李旭团队提出以多源数据融合为基础的岩体评估体系,基于神经网络和稳定性指标量化评估围岩状态,制定支护方案。但TBM智能感知也面临数据标准化、跨工程迁移性、模型可靠性与现场应用等问题和挑战。

### (3) 智能驾驶方面

TBM实现了高度的机械化集成和信息化升级,正在迈向智能化,其中智能驾驶是智能化的核心环节。当前研究主要围绕参数推荐展开,上海隧道工程股份有限公司吴惠明提出的盾构自动驾驶技术通过多源传感信息融合,实现掘进参数与姿态的动态优化,减少人工干预;浙江大学张亚坤则强调构建“感知—认知—决策—执行”闭环体系,推动TBM从被动监测向主动智能控制转变,使围岩识别与参数调整能够实现自适应。但是目前智能驾驶主要针对掘进工序,对于换步、支护等工序的搭接考虑不足,同时推荐参数的合理性和适用性有待进一步验证,复杂地质情况下的需求更为强烈。智能盾构的自主化运行依赖于一套协同演进的算法与参数体系,其核心在于通过多模块的技术融合实现从地质感知到精准控制的完整闭环。在地质识别方面,采用k-means聚类与XGBoost相结合的机器学习方法,依托地质勘探数据和实时掘进参数实现对前方地层的精准预测;压力平衡控制则通过模糊PID与自适应动态规划等算法,对土仓压力、螺旋输送机转速等关键参数进行动态调节,确保开挖面稳定。智能决策系统借助多目标优化算法与LSTM预测模型,以掘进速度、能耗与刀具磨损为优化目标,通过调整推力、刀盘扭矩等决策变量实现综合性能提升。姿态控制模块采用CNN-RNN混合网络进行轨迹预测与纠偏,依据推进油缸的压力与位移偏差实现精准导航。尽管如此,该技术体系仍面临模型泛化能力不足、多系统耦合优化复杂等挑战。未来需进一步发展基于数字孪生的协同控制框架与跨项目迁移学习技术,以推动隧道掘进向全流程自主化方向演进。

## 三、TBM的发展方向

### 1. 面向超长深埋隧洞

随着我国水网工程持续建设,超长距离、超大埋深已逐渐成为隧洞建设的显著特点,如何适应长距离独头掘进、高地应力安全施工,是新时期TBM水工隧洞建设必须回答的问题。为保障工程进度和安全,TBM作为主要施工设备,需要实现地质条件感知、智能掘进支护与整体工序协同的有机统一。①TBM设备需具备感知围岩地质条件能力,能够融合超前地质预报、随钻感知、岩渣图像识别、微震监测等多源地质信息,综合研判掌子面近前方—中距离—远距离的围岩地质情况,作为后续掘进策略和支护方案制定的基础;②TBM设备需具备一定程度的自主掘进和智能决策能力,通过数字孪生技术和智能算法的有机结合,实现掘进参数的预设定与自适应微调,做到地质识别、风险预警与施工参数动态优化的多功能统一,解决应对复杂地质条件难决策和决策滞后的问题;③TBM施工状态和设备状态评估是保障超长距离施工连续性的关键,对于轴承、大齿圈、变速箱、主驱动电机等关键部件需要实现全生命周期监测,对运行故障要进行早期诊断,轻微故障需要具备自检自修能力。同时,随着掘进距离和埋深的增加,通风降温、渣料排运、能源供应和管片运输等配套系统的稳定性也需关注。

### 2. 面向极端地质条件

极端地质条件仍然是影响TBM施工安全与效率的核心难题,尤其是我国西南山区生态脆弱、地质复杂、施工环境恶劣,在该区域采用TBM工法对设备防护水平和施工能力提出了更高的要求,同时也要求参建单位将施工理念从“被动防护”向“主动感知与动态控制”转变。对于极高地应力条件下施工,可在整合微震监测与TBM掘进参数的基础上,结合深度学习算法,对岩爆位置和等级进行超前预警,从而对高风险洞段提前采取超前注浆加固或超前钻孔释放应力等处置措施。在此基础上,结合针对性抑爆与柔性支护技术,实现对岩爆危害的动态控制。对于高地温环境下施工,一方面,发展高效主动降温技术,通过更大功率的智能变频通风系统,耦合其他主动降温手段,控制掌子面温度;另一方面,降低TBM设备的工作产热能力,保障关键设备在高温环境下不过热,确保施工安全。

### 3. 面向智能建造与绿色施工

智能建造和绿色施工是TBM技术发展的必然趋势,

未来TBM将具备自主决策、自适应控制、自检自修等功能,真正意义上实现少人化、无人化的掘进施工。大数据和人工智能是决策中枢的“智能大脑”,想要充分发挥算法优势,首先需要打破数据壁垒,实现行业数据融合,集成和分析地质、设备、环境等多源信息,通过垂直模型应用进行专业问答、方案辅助编制,优化掘进参数和制定施工方案。此外,数字孪生技术将实现物理TBM和数字TBM的实时交互,通过开发与物理TBM实时映射的高保真数字孪生系统,基于“数字预演”模拟TBM施工,预估TBM工作状态,将重点转向精准建模与闭环控制。最终实现有限条件下的自主决策,并通过研发新一代人工智能算法,保障TBM具备应对复杂突变地质条件的能力,形成在安全边界内的自主决策能力。

对于绿色施工,其重点在于将环保持续性理念贯穿于掘进全过程,例如建立洞渣资源化高效利用体系,将洞渣转化为符合标准的砂石骨料。在特长隧道中,推广变频智能通风系统和液氮降温等主动降温技术,并作为长隧施工的强制性标准。同时,借鉴汕头—梅州高速公路等工程经验,推动TBM工程向环境友好方向发展。

#### 四、结语

经过多年发展,我国水工隧洞TBM的整体施工水平和相关技术取得了显著进步和重点突破,在制造水平、施工能力等方面已经跃居世界领先地位,但随着国家水网建设和西南能源开发等持续推进,TBM施工仍面临长距离、大埋深和复杂地质等诸多因素的挑战,主要表现在:①地质灾害的预警和处置能力不足,岩爆、围岩大变形及突涌水(泥)等问题仍威胁施工安全;②设备在恶劣环境下长期运行的可靠性与耐久性有待验证,核心部件的国产化仍需继续推进;③智能化应用程度不高,智能化仍处于辅助决策阶段,距离完全自主掘进尚有差距。

未来,TBM技术应着重提升灾害识别与防控能力,突破关键部件的材料与结构瓶颈,推动智能化从决策支持向自主掘进演进,并在绿色施工与节能降耗方面实现实质性突破。而上述问题的攻关需要跨学科、跨领域的协同创新,产学研用的深度融合,共同推动TBM领域技术的迭代优化与升级创新。

#### 参考文献:

- [1] 王浩,王建华,秦大庸.流域水资源合理配置的研究进展与发展方向[J].水科学进展,2004(1):123-128.
- [2] 董鹏,陈祖煜,刘桢,等.秦岭输水隧洞工程[M].北京:中国水利水电出版社,2024.
- [3] 王梦恕.中国盾构和掘进机隧道技术现状、存在的问题及发展思路[J].隧道建设,2014,34(3):179-187.
- [4] 邓铭江.深埋超特长输水隧洞TBM集群施工关键技术探析[J].岩土工程学报,2016,38(4):577-587.
- [5] 王鹰,李立民,谭伟,等.引汉济渭工程超长深埋隧洞岩爆特征及防治技术研究[C]//中国地质学会工程地质专业委员会.2016年全国工程地质学术年会论文集.2016:891-897.
- [6] DUAN K M, ZHANG G F, SUN H. Construction practice of water conveyance tunnel among complex geotechnical conditions: a case study[J]. Scientific Reports, 2023, 13(1): 15037.
- [7] 杨延伟.引大入秦工程Ⅱ标30A隧道使用双护盾TBM和施工组织简介[J].隧道建设,1993(1):47-50.
- [8] 齐梦学.我国TBM法隧道工程技术的发展、现状及展望[J].隧道建设(中英文),2021,41(11):1964-1979.
- [9] 孙云,张云旆,刘立鹏,等.基于滇中引水的TBM数据预处理与特征参数分析[J].地下空间与工程学报,2023,19(2):594-608.
- [10] 张金良,许弘毅,龚秋明,等.TBM滚刀与高压水射流布局对滚刀破岩效率影响的室内试验[J].中国公路学报,2024,37(7):204-217.
- [11] 康民强,白杨,李平,等.面向TBM应用的激光辅助破岩技术现状及展望[J].激光与光电子学进展,2025,62(13):145-157.
- [12] 徐福通,周辉,李彦恒,等.水力联合TBM射流移动速度与切割能力匹配问题[J].中南大学学报(自然科学版),2022,53(10):4024-4035.
- [13] 曹奥,高宏力,范书伟,等.制造误差与局部缺陷耦合激励下TBM主轴承动态特性研究[J/OL].西南交通大学学报,1-10[2025-09-11].<https://link.cnki.net/urlid/51.1277.U.20250711.1646.002>.
- [14] 张孟琦.TBM刀具材料力学性能测试分析[D].长春:吉林大学,2018.
- [15] 王好平,张蒙祺,莫继良.盾构/TBM滚刀刀圈性能强化研究现状[J].材料导报,2022,36(7):49-57.
- [16] 胡望来,付亮.浅析抽水蓄能电站TBM应用的综合效益[J].四川水力发电,2025,44(4):134-137.
- [17] 贾连辉,孙恒,张兴彬,等.大倾角引水斜井TBM关键技术研究及应用[J].隧道建设(中英文),2024,44(8):1660-1668.

- [18] 章跃林, 范以田, 王彦峡, 等. 双护盾掘进机施工的长大水工隧洞关键技术应用研究[C]//中国岩石力学与工程学会. 和谐地球上的水工岩石力学——第三届全国水工岩石力学学术会议论文集. 2010: 315-318.
- [19] 卢松, 陈炜韬, 汪旭. TBM 破岩震源 HSP 法实时超前地质预报技术及应用[J]. 地下空间与工程学报, 2025, 21(S1): 376-385+395.
- [20] WANG P, ZHANG S S, CHEN D W, et al. A comprehensive analysis method for adverse geology in tunnels based on geological information and multi-source geophysical data[J]. Applied Geophysics, 2025, 22(1): 1-10.
- [21] 杨凡, 隋世军, 张雨霆. 深埋隧洞 TBM 岩石围岩大变形支护设计方法研究[J/OL]. 水利水电快报, 1-11[2025-07-18]. <https://link.cnki.net/urlid/42.1142.TV.20250523.1541.008>.
- [22] 许汉华. 滇中引水香炉山隧道地质问题研究进展[J]. 江西建材, 2025(3): 9-12.
- [23] 张升, 贺佐跃, 滕继东, 等. 考虑结构性的软岩热弹性本构模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(3): 571-578.
- [24] 丁秀丽, 张雨霆, 黄书岭, 等. 隧洞围岩大变形机制、挤压大变形预测及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(3): 521-544.
- [25] 龚成明, 孟庆余, 李五红. 隧道穿越断层破碎带的安全施工技术[J]. 铁道工程学报, 2012, 29(5): 45-48+100.
- [26] 刘琪, 张传健, 颜天佑, 等. 敞开式 TBM 穿越断层破碎带时岩-机作用分析——以滇中引水工程香炉山隧洞为例[J]. 人民长江, 2021, 52(10): 165-175.
- [27] 李召朋, 李鹏. 引汉济渭秦岭隧洞 TBM 施工段突涌水涌泥施工技术探讨[J]. 水利建设与管理, 2015, 35(3): 12-14.
- [28] 齐梦学, 杨国清, 曾绍毅. 全断面岩石隧道掘进机 (TBM) 施工超前处置技术综述与思考[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(9): 1555-1564.
- [29] 陈炳瑞, 冯夏庭, 曾雄辉, 等. 深埋隧洞 TBM 掘进微震实时监测与特征分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(2): 275-283.
- [30] 龚秋明, 余祺锐, 侯哲生, 等. 高地应力作用下大理岩岩体的 TBM 掘进试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(12): 2522-2532.
- [31] 欧阳林, 张如九, 刘耀儒, 等. 深埋隧洞岩爆防控技术及典型工程应用现状综述[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(12): 161-170.
- [32] ZHANG Y P, CHEN Z Y, JIN F, et al. Cross-project prediction for rock mass using shuffled TBM big dataset and knowledge-based machine learning methods[J]. Science China Technological Sciences, 2023, 66(3): 751-770.
- [33] 吴惠明, 周文波, 王伊. 盾构自动驾驶技术及应用[J]. 隧道建设(中英文), 2024, 44(11): 2107-2118.
- [34] ZHANG Y K, GONG G F, YANG H Y, et al. From tunnel boring machine to tunnel boring robot: perspectives on intelligent shield machine and its smart operation[J]. Journal of Zhejiang University-Science A (Applied Physics & Engineering), 2024, 25(5): 357-382.
- [35] 王喜峰. 统筹发展与安全视域下国家水网基础设施建设方略研究[J]. 齐鲁学刊, 2022(3): 124-133.
- [36] 张民庆, 王江, 王万齐, 等. 铁路隧道 TBM 施工信息化监控技术研究与应用[J]. 铁道工程学报, 2022, 39(5): 65-72.
- [37] 刘耀儒, 侯少康, 魏芳, 等. TBM 智能施工研究进展及展望[J]. 隧道建设(中英文), 2025, 45(1): 21-45.

责任编辑 刘磊宁