doi: 10. 20238/j. issn. 1671-4172. 2026. 06. 021
梁磊, 杨小聪, 柴慧珍, 等. 金属矿山TBM应用研究框架和主要改进方向[J]. 有色金属(矿山部分), 2026, 78(6): 207-224.
Liang Lei, Yang Xiaocong, Chai Huizhen, et al. Research framework and main improvement directions for TBM application in metal mines[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2026, 78(6): 207-224.

金属矿山TBM应用研究框架和主要改进方向

梁　磊[1], 杨小聪[2], 柴慧珍[1,3], 初士俊[1,4], 黄　丹[2]
(1. 中国十五冶金建设集团有限公司, 武汉 430075;
2. 矿冶科技集团有限公司, 北京 100160;
3. 中南大学 资源与安全工程学院, 长沙 410083;
4. 中南大学 资源加工与生物工程学院, 长沙 410083)

摘　要: TBM法是一种安全高效的掘进方法, 已经成为金属矿山开采技术的重要发展方向。但是与市政、公路、铁路、水利等领域相比, 金属矿山具有地质条件复杂、井巷系统交错、施工组织耦合等特点, TBM应用存在诸多问题。本文针对金属矿山领域, 分析了TBM应用存在的问题, 明晰了核心需求, 运用“系统化思维＋结构化方法”构建了“装备研制-设计建造-建设施工-配套保障”的TBM应用研究框架, 提出了改进方向, 以期推动TBM法在金属矿山的广泛应用。

关键词: TBM; 金属矿; 装备研制; 设计建造; 建设施工; 配套保障
中图分类号: TD421　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1671-4172(2026)06-0207-18

Research framework and main improvement directions for TBM application in metal mines

Liang Lei[1], Yang Xiaocong[2], Chai Huizhen[1,3], Chu Shijun[1,4], Huang Dan[2]
(1. China 15th Metallurgical Construction Group Co., Ltd., Wuhan 430075, China;
2. BGRIMM Technology Group, Beijing 100160, China;
3. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;
4. School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The TBM method is a safe and efficient excavation method and has become an important development direction of metal mining technology. However, compared with municipal engineering, highway, railway, and water conservancy fields, metal mines are characterized by complex geological conditions, intertwined shaft-roadway systems, and coupled construction organization, so many problems remain in TBM application. Focusing on the field of metal mines, this paper analyzes the problems existing in TBM application, clarifies the core requirements, and applies "systematic thinking＋structured method" to construct a TBM application research framework of "equipment development-design and construction-construction execution-ancillary support". It also proposes improvement directions, with the aim of promoting the widespread application of the TBM method in metal mines.

Key words: TBM; metal mine; equipment development; design and construction; construction execution; ancillary support

金属矿产资源在国民经济发展和社会物质文明与科技进步中发挥着举足轻重的作用[1]。地下矿山是金属矿开采的主战场[2], 目前, 金属矿山巷道掘进仍以钻爆法为主, 由于其工艺的不连续性, 以及爆破作业的有害效应, 掘进速度受限, 且随着开采深度增加, 矿山通风、降温难度增大, “三高一扰动”影响加剧, 掘进进尺愈发迟缓, 井下作业安全风险同步攀升,

收稿日期: 2026-09-24
作者简介: 梁　磊, 正高级工程师, 博士研究生导师。

“采掘失衡”矛盾凸显[3-4]。因此,采用机械化连续掘进方式是实现金属矿山巷道安全高效掘进的重要发展方向[5]。

TBM(全断面隧道掘进机、Tunnel Boring Machine)是集机械、电气、液压、控制、信息等技术于一体的机械化、自动化隧道掘进设备,可实现破岩、出渣、支护等多工序协同连续作业[6-7]。自20世纪90年代以来,TBM在我国飞速发展,现已广泛应用于市政、公路、铁路、水利水电等隧道工程,近年来在煤矿和抽水蓄能领域也有较多应用[8-9]。相较于钻爆法,TBM掘进具有安全性能高、掘进速度快、围岩扰动小、施工质量优、自动化程度高等优势[10]。随着TBM在小半径转弯、大坡度通行、高效能掘进等方面的提升与发展,自2022年起逐渐在我国金属矿山得到应用[5]。广大科研工作者在金属矿山TBM掘进方面开展了大量深入的研究,获得了一些有益的结论与见解,但TBM在金属矿山应用中仍存在诸多问题与挑战。

本文运用“系统化思维+结构化方法”,通过分析金属矿山巷道掘进特点与TBM应用需求,综合既有研究与实践,提出TBM在金属矿山应用的研究框架与改进方向,为推动TBM掘进技术在金属矿山的广泛应用提供助力。

1 金属矿山巷道掘进特点及TBM应用需求

1.1 金属矿山巷道掘进特点

从TBM应用角度,金属矿山巷道掘进具有地质条件复杂、井巷系统交错、施工组织耦合等特点,给其带来严峻挑战。

1)地质条件复杂

地下金属矿成矿作用受控于多种地质因素,呈现出多样化的成矿规律特征[11]。地下金属矿床以岩浆岩、变质岩为主,主要产生在岩浆岩与沉积岩或变质岩的接触带上以及地质构造活跃或突变部位[5]。金属矿山巷道服务于矿石开采,巷道布局受矿体产状及开采方式影响,如图1所示,巷道开拓往往需穿越不同类型、不同强度、不同完整性的多个岩层,岩性变化大,结构复杂多变,常遇断层破碎带、蚀变带及软硬互层带,对TBM工法的地质适应性提出更高要求。

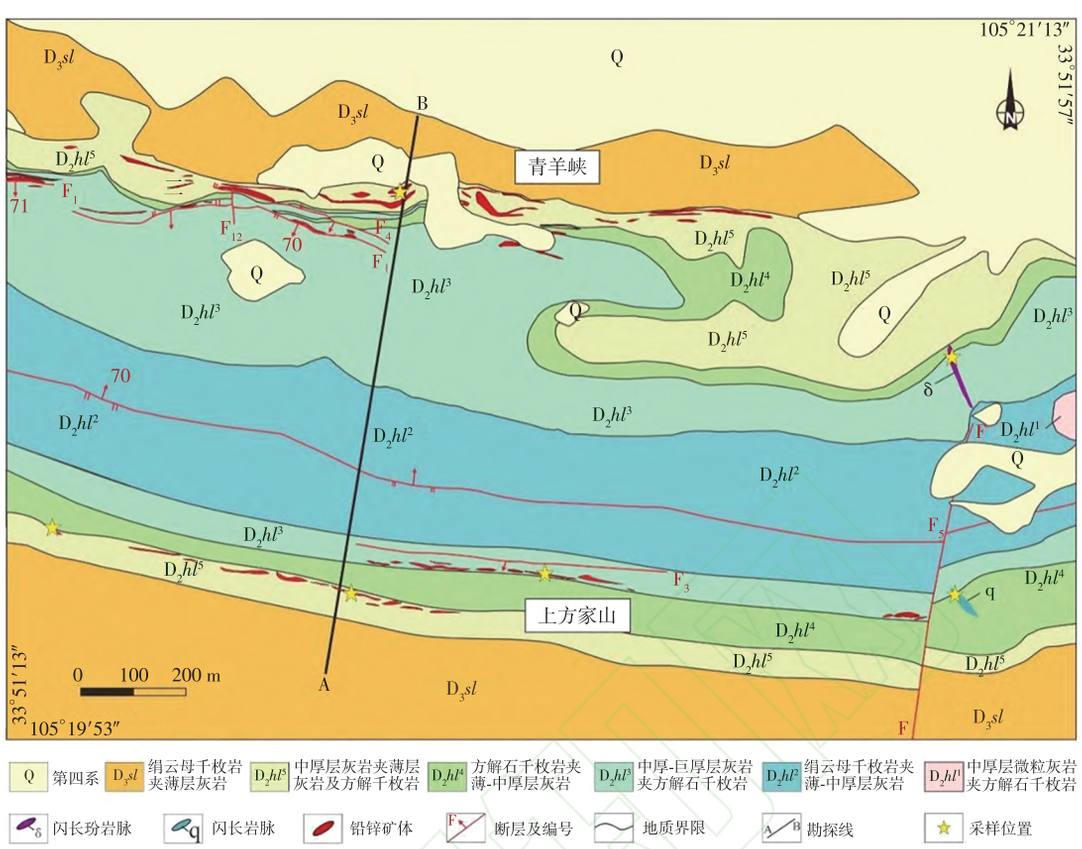


图1 西秦岭西和县青羊峡-上方家山铅锌矿床地质图[12]

Fig. 1 Geological map of the Qingyangxia-Shangfangjiashan Pb-Zn deposit in Xihe county, western Qinling Mountains[12]

深部巷道掘进面临着高地应力、高地温、高渗透压及开挖过程中的强烈扰动等问题[13-14]，深部环境下，岩爆、突泥涌水等灾害风险加大，通风排水难度增加、作业条件恶化，对 TBM 安全高效应用提出更大挑战。

金属矿山开采前期地勘资料基本围绕矿体进行，且由于高井深作业，地质钻孔困难，通常不具备开展详尽地质调查的条件与时间[8]。导致 TBM 掘进路线上的地勘资料较少，勘查程度有限，难以获取准确的超前地质探测结果，TBM 工程地质模型存在较大不确定性，对 TBM 工法地质预报及应急支护提出更强需求。

2）井巷系统交错

金属矿山井巷系统立体多元、纵横交错，开拓-采准-回采三级巷道分工明确，普遍采用多中段开拓方式，如图 2 所示。为减少开拓及采准工程量，金属矿山巷道通常根据矿体产状调整[5]，水平方向上以短距离、小转弯巷道为主，往往是多条短直线巷道与小半径转弯巷道组合而成，垂直方向上存在长距离大坡度叠加转弯工况巷道，巷道系统由多条巷道平行或交叉汇合布置，巷道线路复杂且立体多元，对 TBM 设备的灵活性提出更高要求。

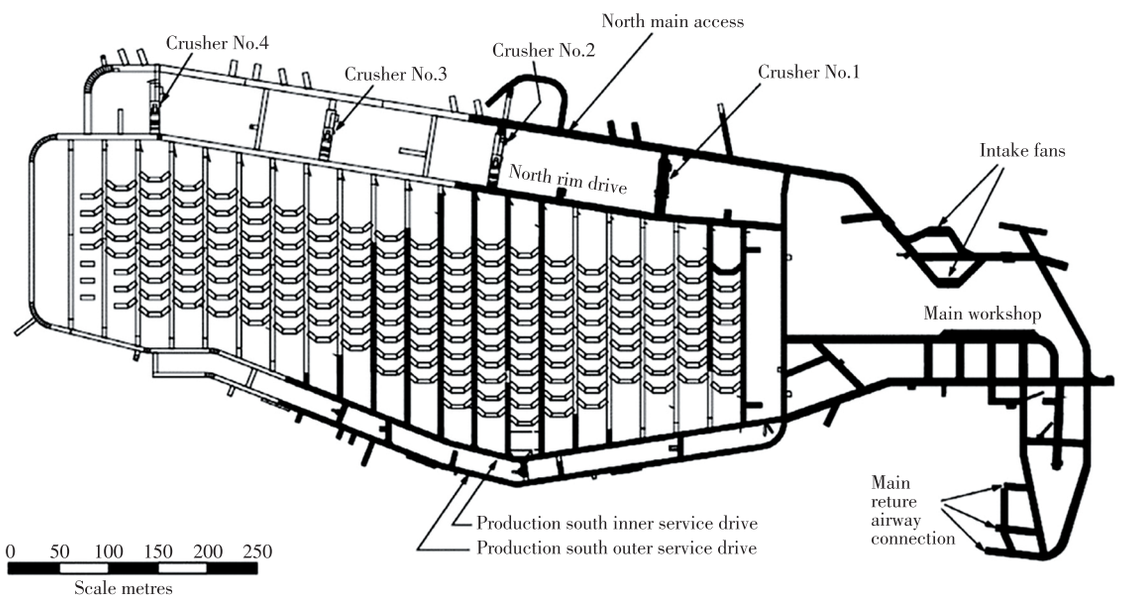


图 2　南非 Palabora 铜矿生产中段布置[15]

Fig. 2　Production level layout at Palabora copper mine in South Africa[15]

金属矿山巷道断面尺寸相对较小，其 TBM 开挖直径通常为 3～6 m，普遍小于其他行业隧道工程 TBM 开挖直径[8]。在金属矿山巷道有限空间内需满足出渣、支护、物料运输、通风等工艺平行作业要求，对 TBM 设备功能配置、工程设计及施工组织等方面均提出更大挑战。

3）施工组织耦合

金属矿山巷道掘进仅为矿山工程建设的一部分，需服从矿山整体工程布局与开采规划[5,8]，为缩短建设周期，在保证安全和质量的情况下，常采用多线施工的方式。巷道掘进过程中往往需增设错车硐室、排水仓及通风仓等辅助洞室，以满足施工组织与系统功能需求。同时，掘进、支护、运输、通风、排水等多道工序须协同作业，形成高度耦合的施工链条。受限于巷道线位布局，掘进线路内部不可避免地存在工序交叉与施工区段重叠，出渣运输与物料供给等环节亦需共用通道资源，导致多作业面之间相互制约，施工干扰显著，组织管理复杂度大幅提升。因此，对 TBM 工程设计、施工组织管理、矿山整体开采设计及生产系统的融合衔接提出更高要求。

1.2　金属矿山 TBM 应用需求

金属矿山 TBM 应用矿种分布如图 3 所示，其应用场景以金属硬岩地层为主。TBM 工法的应用推广需着力提高适用性、便捷性、系统性和经济性，以实现技术与经济效益的协同优化。

1）高适用性。传统 TBM 机身较长、转弯半径较大，难以适应金属矿山短距离、多转弯、大变坡的巷道布局及复杂多变的地质工况。需提高 TBM 设备的灵活性、对复杂地质的适应性，发展短机身、小转弯半径、模块化、组合化的 TBM，研发机-岩互馈的智

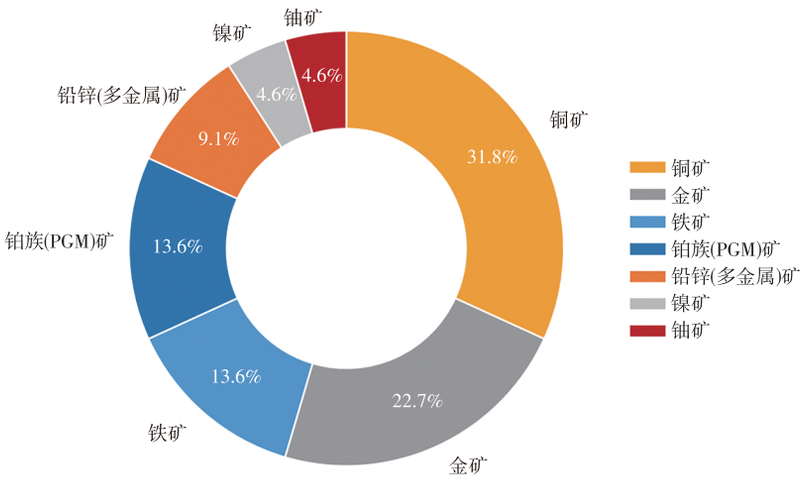


图3 金属矿山TBM应用矿种分布统计[15]

Fig. 3 Statistics on the distribution of mineral types for TBM applications in metal mines[15]

能掘进系统，提升对复杂地质和工况的耐受能力与适应灵活性。

2)高便捷性。部分为应对多工况而配置的TBM功能单元使用率较低，造成TBM设备功能冗余，提升了设备长度与造价，且TBM设备部件数量多、尺寸大，在井下受限空间内运输、组装、拆卸、维修都较为困难。需提高TBM作业便捷性，追求TBM设备轻便化、小型化，功能模块化配置，实现易拆解、易运输、易换件、易维修，并能根据工况进行快速功能组合与切换。

3)高系统性。应用TBM进行金属矿山巷道掘进需服从于整体开采规划，TBM掘进线路上不可避免存在内部交叉施工、生产交叉施工，TBM掘进速度受到矿石运输、措施工程、交叉作业等因素限制。需提高TBM工法的系统协调性，考虑永临结合，以采定掘，逆向设计，实现TBM工法与矿山既有及规划的生产系统(运输、提升、采矿)无缝衔接、协同优化。

4)较高经济性。金属矿山矿石品位偏低、基建投入大、经济敏感度高，相较于钻爆法，TBM工法筹备周期长、前期投入与单位掘进成本偏高，面临着经济性的制约。需提高TBM工法的经济适用性，确立明确的TBM工程经济性指标，降低TBM设备造价与延米成本，建立全生命周期TBM工法综合经济性评价体系，提高TBM工法全生命周期经济适用性，提升TBM工法的竞争力。

2 金属矿山TBM应用研究框架

为满足TBM在金属矿山应用的核心需求，本文提出“一个核心、两条主线、五项支撑”的综合性研究框架，如图4所示。运用“系统化思维＋结构化方法”，将金属矿山TBM适应性应用所面临的核心问题，落实到装备研制、设计建造、建设施工、配套保障四大板块的细分模块层面，系统性梳理改进创新方向，进而提高问题解决的针对性、实用性和可操作性，为TBM在金属矿山的应用提供改进方向与借鉴思路。

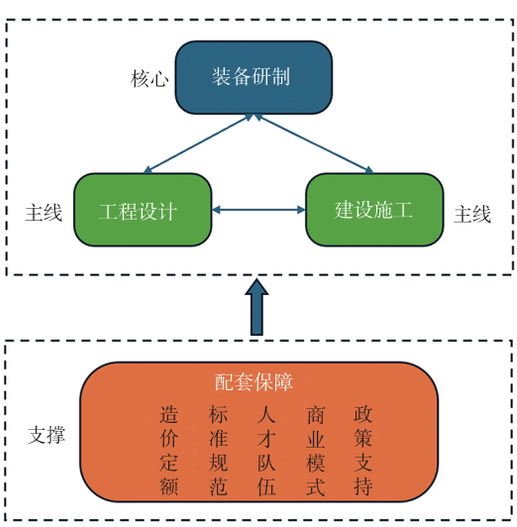


图4 金属矿山TBM应用研究框架图

Fig. 4 Framework diagram for research on the application of TBM in metal mines

装备研制板块作为应用研究的核心支撑，聚焦TBM及相关装备的实用性、可靠性与适配性，针对金属矿山特殊环境，主要开展小型化整机结构优化、超前探测与不良地质处理系统研发、硬岩高效低扰动掘进系统设计、快速联合支护技术攻关、连续出渣与通风排水等辅助系统集成，以及基于感知-决策-

控制的智能掘进系统开发等研究，确保设备满足复杂地下环境需求。

设计建造板块衔接装备研制与建设施工，聚焦工程整体布局合理性、技术适配性与实施可行性，主要研究矿山地质条件的TBM适应性评价方法、基于金属矿山应用的开拓方案研究、断面及线路优化、TBM机型参数选配与性能匹配、后配套系统工程协同设计，以及全寿命周期工程经济性评价体系构建等内容，将需求转化为具体工程方案。

建设施工板块是应用研究框架的落地实施，聚焦设计建造方案的有效执行，围绕施工质量、效率、安全管控，重点研究井下受限空间拆解运输与精准组装技术、掘进-支护-出渣协同作业工艺、施工期围岩稳定性动态监测与预警、关键部件维护保养策略、拆机退场技术，以及破碎带、岩爆、涌水等复杂地质条件的施工处理对策，保障设计方案的高效安全落地。

配套保障板块支撑全流程高效协同与长效运行，聚焦技术规划化推广的配套服务保障，主要研究金属矿山TBM工程预算定额与造价管控体系、设计施工与验收系列标准规范编制、专业人才跨学科培养与技能提升模式、设备租赁/工程总包等商业运营模式创新，以及产业推广的财税金融等政策支持机制，确保研究成果转化与规模化应用。

3　装备研制

TBM在金属矿山应用涉及的装备研制环节，可分解为整机结构、探测系统、掘进系统、支护系统、出渣系统、辅助系统、数智系统七个方面，如图5所示。下文将围绕这七个方面，逐一梳理各自面临的核心问题及改进创新方向。

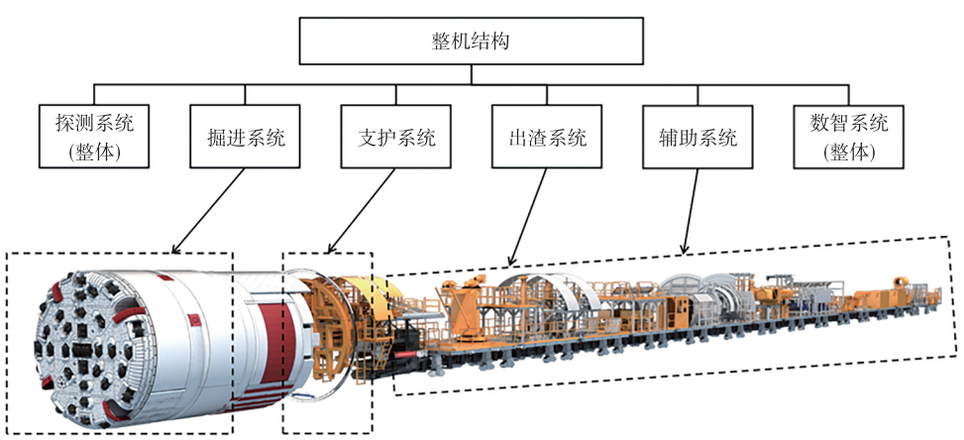


图5　“中国有色二号”设备示意图

Fig. 5　Schematic diagram of the "China Nonferrous No. 2" equipment

3.1　整机结构

金属矿山TBM在整机结构上暴露的问题，集中体现在设备类型和整机布局两个方面。

设备类型方面，问题主要表现为选型空间狭窄和模块化设计缺失。现阶段可选机型基本局限在敞开式、单护盾和双护盾这几种传统型式，对比维度单一，很少考虑功能融合，设备选型时几乎都是按通用性考虑，面对复杂多变的工况，单一设备类型适应性明显不足。同时，设备功能单元一旦定型就固化下来，缺乏模块化设计理念，导致设备复用改造困难、改造周期拉长，难以灵活响应不同工程的实际需求。

整机布局方面，突出矛盾在于设备尺寸过大与井下受限空间的冲突。整机尺寸较长，遇到不良地质段时整机通过性差，进入小半径转弯段容易发生干涉甚至卡机，整体机动性不足，在罐笼下放和巷道长距离运输环节受限，拖慢井下快速部署的节奏。

针对上述短板，改进的着力点应放在TBM整机核心装备的研发上，具体可从以下两个方向进行创新：

1）紧凑型TBM整机开发。研制紧凑型TBM，缩短设备长度提升设备的灵活性和快速部署能力。通过提高TBM功能系统的模块化装配能力，提高自动化作业水平，加速完成模块化快速拆装达到始发条件。有效适配空间狭窄、工期紧张的特殊作业场景，弥补传统大尺寸TBM部署周期长、空间要求高的缺陷。

2）选型模块化配置研究。基于金属矿山地层岩性多变、地质条件复杂、线路设计差异显著的巷道掘

进特点，构建一套覆盖设备选型全流程的模块化配置方案全集，全面梳理可选功能模块，明确各自的技术参数、适用工况和边界条件。在此基础上，只需输入具体矿山的地质勘察数据和巷道线路设计指标，就能快速生成个性化选型配置方案，由此跳出凭经验选型的传统模式，为科学选型、精准适配提供系统化理论支撑。

3.2 探测系统

探测系统的核心问题，集中体现在超前探测装置和超前处置装置两个层面。

超前探测装置方面，主要短板在于探测手段单一，缺乏多方法相互校核与综合分析，超前地质预报的精度与分辨率偏低，多源数据融合困难，难以精准识别断层、溶洞、软硬不均体等复杂地质构造，尚未达到“前瞻性预判”的要求。

超前处置装置方面，存在的问题包括装置尺寸偏大，难以适应井下狭窄空间；处置效率不高、自动化程度偏低，处置工艺与TBM掘进工艺缺乏协同，工序复杂、耗时偏长；加之“探”与“处”装置彼此独立，工序衔接迟滞，处置效果难以及时检验，与“及时、高效、可靠处置”的目标尚有差距。

针对上述短板，改进创新可沿以下两个方向展开。

1)TBM机载超前地质预报系统研发。着力提升超前地质预报精度与实时性，基于不良地质前沿探测理论，研制可直接搭载于TBM主机的短距离高精度探测装备，实现对掌子面前方不良地质体的精细化识别与定位。同时，集成多种探测手段，构建多源数据在线监测与融合分析平台，实现地质信息的实时采集、动态分析与精准预警，从而有效提升超前地质预报的准确性、实时性和可靠性，为规避地质灾害、保障施工连续性提供核心技术支撑。

2)TBM机载探处一体化设备研发。针对探测与处置分段实施带来的效率损失，研发集靶向钻探、随钻测量、定点取芯、孔壁成像、孔内雷达探测和同孔注浆支护等功能于一体的TBM机载探处一体化装备。通过地质探测与灾害处置工艺的深度耦合与同步作业，提高不良地质条件的处置能力与时效性，为TBM在复杂地质条件下实现连续高效掘进提供保障。

3.3 掘进系统

掘进系统的核心问题，主要体现在掘进断面形式和刀具系统两个层面。

掘进断面方面，当前金属矿山TBM掘进断面均为圆形，后续需回填以满足巷道设计要求，断面利用率偏低，与采矿作业的衔接不够紧密。

刀具系统方面，问题涉及布置、磨损和维护多个环节：刀具布局不合理导致破岩效率低、磨损不均，偏磨、弦磨等非正常损坏占比较高；岩性多变条件下刀具磨损速度加快，换刀频次随之攀升；加之磨损状态缺乏实时感知手段，换刀时机依赖经验判断，科学性不足。

针对上述短板，改进创新可沿以下三个方向展开。

1)异型断面掘进系统研发。研发能一次成型“平底直墙半圆拱”异型断面的TBM掘进配置系统，通过优化主机掘进机构，实现TBM掘进与异型断面同步一次成型，或配套小型跟随式装备完成断面精细化修整，有效提升巷道空间利用率，强化巷道结构与采矿作业流程、采矿设备的匹配度，减少后续巷道改造工程量，合理控制综合施工成本。

2)TBM辅助破岩系统研发。针对超硬岩工况，研发融合高压水射流、机械预切割、微波、激光等技术的TBM辅助破岩系统装备，通过辅助破岩手段预先弱化岩石强度、破碎岩石结构，降低主掘进刀具的工作负荷，从而提升超硬岩地层的掘进效率，延长刀具使用寿命，降低施工耗材成本与设备运维费用。

3)刀具优化配置与智能管控系统研发。依据刀盘类型采用非线性双螺旋线等布置方式，对中心区与边缘区实施差异化配置，通过楔块拉紧式安装结构和模块化滚刀互换方案提升更换效率与工况适配性。基于多源传感信息融合的刀具磨损实时监测[16]，推动“按需换刀”；基于岩石磨蚀性指数与掘进参数构建刀具寿命预测模型，为备件计划和换刀时机提供决策依据。同时，持续开展刀具结构、材料及表面处理技术的研发，从源头提升破岩性能与耐用度。

3.4 支护系统

支护系统的核心问题，主要体现在支护装置的作业能力、智能化水平和系统集成度三个方面。

作业能力方面，传统TBM机载锚杆钻机作业自由度不足、空间占用大，拱顶作业范围一般小于180°，且只能沿单一方向固定轨道移动，难以灵活覆盖全断面支护需求。

智能化水平方面，传统TBM机载喷混装置喷浆质量不高、智能化程度偏低，湿喷平整度差，喷浆路径易堵管，喷浆质量多依赖操作人员经验积累。

系统集成度方面，锚杆施工与喷混作业彼此独立，工序衔接松散，协同效应弱，缺乏系统性支护方案及锚喷一体化装备，支护流程不连续，整体支护效率偏低，对掘进速度形成制约。

针对上述短板，改进创新可沿以下两个方向展开。

1)TBM机载锚杆钻机研发。研发适配TBM主机的多自由度、小型化、模块化智能锚杆钻机，将拱顶作业范围拓展至180°以上，具备前后、左右多维度灵活移动能力，可模块化选配自动换杆装置，完成自动换杆、接杆全流程作业，从而扩大拱顶支护作业覆盖范围，全面提升锚杆支护的智能化、自动化水平与作业效率。

2)TBM机载喷锚一体化装备研发。研发集成化TBM机载喷锚一体化装备，整合锚杆及锚索施工、钢筋排与钢拱架铺设、混凝土喷射等核心支护功能，实现巷道支护全流程一体化、连续化作业，消除多工序衔接耗时，保障TBM掘进与巷道支护同步推进，提升整体施工效率与支护结构稳定性。

3.5　出渣系统

出渣系统的核心问题，主要体现在出渣设备适应性、转载衔接匹配度和运输方式协同性三个层面。

出渣设备方面，连续性小转弯皮带机已经在金属矿山得到推广应用，大幅提高了转载衔接能力，但在小转弯、长距离、大坡度等特殊工况下，设备适应性仍需进一步提升。长距离掘进过程中皮带张紧方式固定，难以维持张力平衡；驱动装置单点驱动能力有限，多点驱动又面临功率分配不均与启停不同步的问题。

转载衔接方面，出渣能力与TBM掘进速度不匹配，转渣能力不足导致TBM设备频繁停机等待，制约了整体掘进效率。

运输方式方面，长距离、大坡度、深部垂直提升等特殊工况下的连续运输方案尚不完善。

针对上述短板，改进创新可沿以下两个方向展开。

1)高适应性连续输送装备研发。针对特定工况研发非标高适应性皮带机，采用叠层布置与专用导料槽实现小半径强制转弯，开发波纹挡边带式输送机解决大坡度乃至垂直提升难题；皮带机驱动方式上采用分段分布式驱动，配合多级控制、顺序启停的智能电控系统，实现软启动与功率自动平衡；张紧控制以闭环自动调控取代固定张紧，集成液压站、张紧绞车、张力传感器与PLC控制器，根据实时张力数据自动调节，维持张力稳定。

2)特殊工况运输系统装备研发。研发长距离大坡度连续出渣设备、深部矿山大运力皮带机垂直输送系统以及长距离双向运输系统装备，全面提升出渣系统在复杂工况下的适应性与运输效能。

3.6　辅助系统

辅助系统的核心问题，主要体现在长距离工况下通风、供电、排水、降温及运输等功能单元性能衰减的加剧[17-19]。

通风方面，传统风管接头多、易破损，随掘进距离延长，漏风率可达30%～50%，有效风量沿程递减，长距离独头巷道末端供风严重不足[20]。

供电方面，地下高温、高湿、大粉尘环境易导致电气设备绝缘老化、故障风险升高，长距离输电压降显著、负荷波动剧烈，供电稳定性进一步下降。

排水方面，设备一次配置排水量有限，长距离大下坡工况下涌水汇集量大、排水路径长，日常排水压力倍增，突发大涌水时更难以快速响应。

降温方面，传统机载制冷系统主机功率大、尺寸大，能耗偏高，占用后配套布置空间较多，长距离掘进时制冷量沿程衰减，作业面降温效果持续恶化。

运输方面，随掘进距离不断延伸，物料供应与人员通勤的运输周期拉长、效率降低，长距离独头巷道内运输装备的系统化整合需求更加迫切。

针对上述短板，改进创新可沿以下五个方向展开。

1)长距离通风装备研发。针对长距离独头巷道通风需求，研发10 km级长距离通风系统装备，优化风机、供回风管路及中继加压装置的配置布局与参数匹配，克服长距离通风阻力，降低风量沿程损耗，保障工作面正压通风稳定达标。

2)长距离高压供电装备研发。研发≥10 kV高压长距离供电系统装备，优化供电线路布局与能效管控，制定标准化高压供电配置方案，提升长距离供电的稳定性、安全性与能效水平。

3)长距离排水装备研发。研发适配10 km级长距离大下坡掘进工况的排水系统装备，集成大流量应急排水单元、智能预警模块与节能管控系统，实现分级排水、动态调配与沉渣分离，兼顾日常废水高效排放与突发涌水应急处置。

4)深部地下降温装备研发。针对深部矿山高温高湿作业环境，研发局部精准制冷型地下降温系统

装备,实现TBM核心区域与作业面局部定向降温,在改善作业环境的同时降低系统综合能耗,提升降温装备运行经济性。

5)长距离运输装备研发。统筹长距离独头巷道物料供应与人员通勤双重需求,研发长距离物料运输与人员交通集成装备,融合无轨与有轨运输设备优势,实现施工物料稳定高效供应与作业人员安全便捷通勤的兼顾。

3.7 数智系统

数智系统的核心问题,主要体现在机载智能掘进平台和信息化云平台两个层面。

机载智能掘进平台方面,掌子面岩性识别实时性不高、准确性偏低,数据可视化与决策高度依赖司机经验,掘进控制未能与前方岩性变化动态耦合,缺乏性能反馈与持续优化机制;刀盘、推进、出渣、注浆等关键执行机构控制相对独立,系统协同困难,自适应能力弱,在软硬不均地层中无法进行精准适应性微调,易引发设备振动或姿态失控。

信息化云平台方面,巷道通信基础薄弱,施工、地质、管理、视频图像等多类数据格式不统一,缺乏可靠的云平台对数据进行有效存储与管理,大量数据难以科学利用。

针对上述短板,改进创新可沿以下四个方向展开。

1)多源感知与岩性识别装备研发。针对掌子面岩性实时辨识需求,融合多源感知信息,形成一体化感知硬件平台,实现掌子面岩性的实时精准识别。

2)智能决策与协同控制系统研发。面向掘进参数优化与多系统联控需求,构建“岩性-设备状态-最优掘进参数”案例库;建立前馈-反馈复合控制架构,实现全局闭环协同;同时配置一键启动、自动纠偏及人工/自动模式切换功能,保障作业安全。

3)数据中台与数字孪生平台研发。针对多源异构数据融合与管理需求,建立统一数据中台,分层构建几何、物理、行为与规则模型,形成TBM数字孪生平台,并深度融入现有智能矿山运营管理体系。

4)施工数据管理与应用系统研发。针对施工全过程数据科学利用需求,建立TBM数据标准化体系,研发专用信息化云平台,支持跨项目多机协同管理,为掘进参数优化与施工效率评估提供系统支撑。

4 设计建造

TBM在金属矿山应用涉及的设计建造环节,可分解为地质适应性评价、工艺设计、工程线路设计、TBM选型设计、TBM配套工程设计、TBM工程经济性评价六个方面,下文将围绕这六个方面,逐一梳理各自面临的核心问题及改进创新方向。

4.1 地质适应性评价

地质适应性评价的核心问题,主要体现在地质信息基础和评价体系两个层面。

地质信息方面,施工前期地质信息量有限,缺乏三维地质模型、岩组模型及水文地质模型支撑TBM工程设计,对前方地质条件的预判缺乏透明化信息载体。

评价体系方面,现有评价标准较为单一,缺乏围岩级别、单轴抗压强度等多参数和断层破碎带、涌水突泥多因素综合评价体系,导致设备选型设计适应性不足、施工成本易超预期。

针对上述短板,改进创新可沿以下两个方向展开。

1)透明地质信息模型构建。综合工程地质、水文地质、岩组及矿体等多源信息,建立三维地质模型,实现TBM掘进前方地质条件的断面分析与预测;同步构建工程地质岩组模型与水文地质模型,为TBM工程设计提供全链条透明地质信息支撑。

2)地质适应性综合评价体系构建。基于围岩级别、单轴抗压强度、磨蚀性、涌水量、地温、有害气体等关键参数,建立与TBM工作条件的量化映射关系;综合各类不良地质条件的等级划分与区段占比,形成地质风险等级及关键参数的输出机制,为TBM设备选型与施工经济性评价提供系统化决策依据。

4.2 工艺设计

工艺设计的核心问题,主要体现在TBM与开采衔接设计、TBM与钻爆法协同设计两个层面。

TBM与开采衔接设计方面,TBM后配套及出渣设备长时间占用部分出矿巷道,与采场其他开拓或回采作业存在空间干涉风险;TBM掘进计划与矿山整体开采计划尚未深度耦合,TBM掘进通风、排水、供电、照明及措施硐室等工程设计未充分兼顾永临结合,造成资源重复建设。

部分工程TBM法与钻爆法施工长度统计如图6所示。长距离TBM施工与短距离钻爆法施工在同一或相邻区域平行作业时,运输、通风、管线布设相互交叉干扰,安全风险高;TBM连续高效掘进与钻爆法间断式作业节奏不匹配,作业空间交叉易造成相互等待,效率损耗明显。

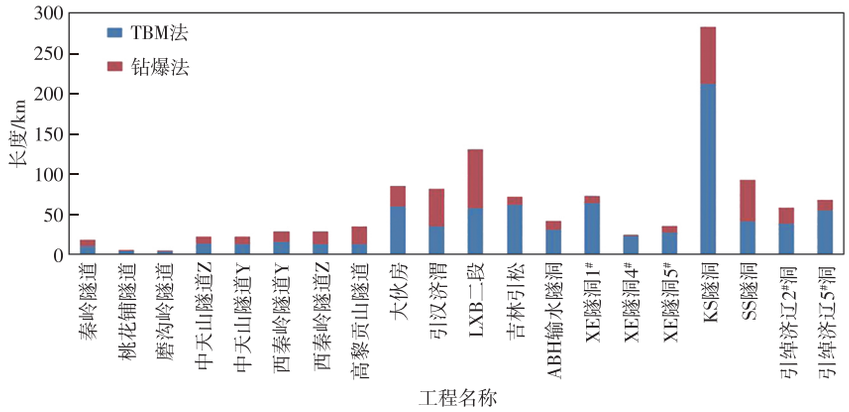


图 6　部分工程 TBM 法与钻爆法施工长度统计[21]

Fig. 6　Statistics on construction length of TBM method and drill-and-blast method in some projects[21]

针对上述短板，改进创新可沿以下两个方向展开。

1）TBM 开拓与矿山开采一体化设计。建立 TBM 开拓与矿山开采一体化设计衔接标准化清单及配套方案，明确衔接节点与技术要求，将 TBM 开拓设计深度融入矿山生产系统，推动通风、排水、供电等工程设施的永临结合设计，实现“为采矿而掘进”的设计目标。

2）TBM 工法与钻爆法协同开拓设计。建立 TBM 工法与钻爆法协同开拓设计方案，将整体工程划分为不同工法主导的区域段，制定明确的分工、交接与并行作业规则，实现两种工法在时间与空间上的有序协同与高效接力。

4.3　工程线路设计

工程线路设计的核心问题，主要体现在井巷设计特征与 TBM 技术要求的双重约束。

线路方面，虽已有小转弯半径 TBM 应用成功案例，但转弯能力仍难以完全适应矿山井巷“短直线、小转弯、大坡度”的形态特点。金属矿山井巷系统立体多元，TBM 连续掘进，未从采矿工艺整体布局层面实现二者的有机结合，如图 7 所示。断面方面，断面尺寸和巷道内部布置尚未形成适应 TBM 工法的标准体系，导致空间利用率低、功能区混乱。

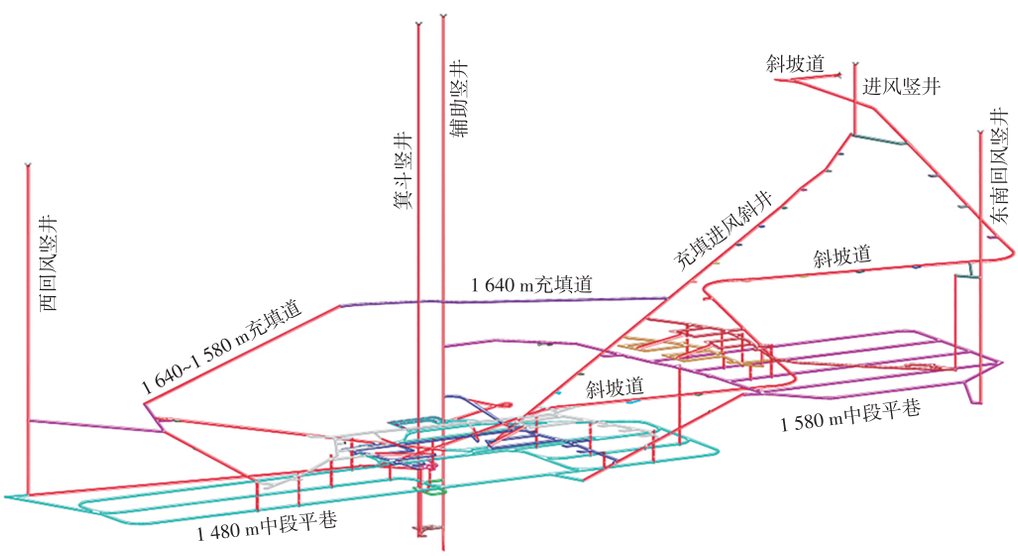


图 7　红泥坡铜矿开拓系统立体图[22]

Fig. 7　Stereogram of development system in Hongnipo Copper Mine[22]

针对上述短板，改进创新可沿以下两个方向展开。

1）TBM 掘进线路设计。建立 TBM 掘进线路设计及前置条件标准化清单，规范采矿与 TBM 并行交互的设计流程与前期准备工作，在采矿需求与 TBM 掘进可行性之间实现双向优化，推动采矿需求与 TBM 掘进可行性的协同提升。

2）TBM 掘进断面设计。建立 TBM 掘进巷道最优断面设计标准化图集，优化圆形断面内廓布置，形

成安全、经济、高效的断面选型方案，减少开挖工程量，实现巷道内部空间的标准化、模块化、整洁化布置，提升空间利用效率与作业便利性。

4.4 TBM选型设计

TBM选型设计的核心问题，主要体现在地质条件匹配、线路特征适配、工期与系统可靠性三个层面。

地质条件匹配方面，岩石单轴抗压强度、磨蚀性指数、节理裂隙发育程度等参数与刀盘推力、扭矩、刀具间距等关键性能参数之间缺乏定量关联模型，难以精准指导设备配置，影响掘进速度与刀具寿命。

线路特征适配方面，掘进线路的长度、转弯半径、坡度与TBM设备能力之间缺乏系统化匹配方法，一次掘进长度超过关键部件设计寿命将导致洞内大修，过短则降低工效与经济性；矿山常规转弯半径与坡度设计往往超出设备极限，对选型提出更高要求。

工期与系统可靠性方面，掘进速度预测多聚焦主机性能，对后配套及辅助系统可靠性、支护与出渣等工序配合度考量不足，单点故障或辅助工序滞后易造成频繁停机与工期延误。

针对上述短板，改进创新可沿以下三个方向展开。

1)地质条件与设备性能匹配设计。建立岩石力学参数与TBM关键性能参数的定量关联模型，以地质数据为输入反推TBM所需的基本性能门槛，实现破岩能力与驱动功率的科学匹配。构建多级岩石强度数据库，应用成熟预测模型计算不同配置下的贯入度、刀具磨损率及掘进速度，为设备配置提供定量依据。量化地层变化指数，优先评价功率储备充足、具备自动调参能力及智能姿态控制的TBM方案。

2)线路特征与设备能力耦合设计。将线路极限几何参数作为设备选型的刚性约束条件，对不满足线路极限值的方案直接排除。对超长线路进行严格的寿命计算，将其分解为多个经济合理的TBM掘进段进行比选。采用失效模式与影响分析方法评估各地质风险，建立“风险-配置”对照清单，将地质风险转化为特定功能配置的强制要求及潜在的工期与成本影响。

3)工期保障与系统可靠性设计。建立涵盖地质参数与实际掘进速度的TBM掘进数据库，采用多元回归或机器学习算法预测各备选机型的掘进速度区间。对掘进-支护-出渣-运输全流程进行可靠性建模，识别瓶颈工序并对关键设备冗余设计水平进行评价。通过离散事件仿真模拟掘进循环，计算各机型理论月进尺，作为工期保障性的核心判据。

4.5 TBM配套工程设计

TBM配套工程设计的核心问题，主要体现在支护标准、渣石资源化利用、长距离配套设计及永临结合设计四个方面。

支护标准方面，现行设计沿用钻爆法体系，未针对TBM掘进断面稳定、围岩扰动小的特点进行差异化调整，导致支护冗余，增加了工程量与成本。

渣石资源化利用方面，TBM掘进渣石粒径小且均匀，具备地下综合利用潜力，但当前设计仍将渣石全部提升至地面处理，转运工序衔接时间长、效率偏低，难以匹配TBM高效掘进节奏。

长距离配套设计方面，通风除尘、供排水、供电、运输等系统在超过10 km级工况下运行难度显著增大，现有设计缺乏针对长距离工况的专项应对方案。

永临结合设计方面，TBM施工期间的措施硐室、通风、排水、供电、照明、通讯等配套工程与矿山永久生产需求缺乏统筹，复用率低，未能实现建设与生产的有效衔接。

针对上述短板，改进创新可沿以下四个方向展开。

1)TBM工法分级支护设计。结合TBM工法扰动小、断面光滑的技术特点，综合考量水文地质条件与围岩等级，建立TBM工法分级支护设计方案，形成针对性的超前处置、即时支护与永久支护配套方案，提升巷道支护的可靠性与经济性。

2)渣石资源化利用设计。建立TBM掘进井下采选充一体化综合利用设计方案，进行渣石井下预选抛废，在转运点设置智能分选系统，将废石直接输送至充填站制备充填料，减少无效提升，实现渣石就地消纳与资源化利用。

3)长距离配套系统专项设计。针对长距离工况下出渣、通风、排水、供电、运输等系统的适应性难题，分别建立连续出渣工艺方案与运输模式衔接方案，优化供回风与中继通风系统布局，制定中继多级排水衔接流程，形成高压进洞、过程升压与动态补偿相结合的供电方案，建立无轨与有轨运输转换或联合运输的工艺方案，全面提升长距离施工保障能力。

4)TBM配套工程永临结合设计。建立TBM工法配套工程永临结合设计标准化清单，涵盖措施硐室、通风、排水、供电、照明、通讯、消防、充填及运输等系统，兼顾TBM施工需求与矿山永久生产功能，

提高配套工程复用率，降低矿山建设综合成本。

4.6　TBM工程经济性评价

TBM工程经济性评价的核心问题，主要体现在成本归集、效益核算与决策方法三个层面。

成本归集方面，金属矿山TBM工程造价分项不全，初始投资仅核算主机设备造价，忽略定制化配置、备品备件、运输及组装等费用，施工综合单价中刀具材料、能耗、维检等成本估算失真。

效益核算方面，当前项目经济性评价仅关注工程建设期直接费用，未将TBM提前投产、永临结合带来的时间价值与系统性收益纳入考量，导致TBM投资在基建阶段显得不经济；同时，钻爆法固有的安全与质量风险成本未进行量化对比，TBM规避此类风险所节约的隐性成本被忽略。

决策方法方面，TBM与钻爆法转换点的选择多依赖地质条件经验判断，缺乏基于矿体分布、工期、成本的量化决策模型，加之TBM进场组装拆卸成本高昂，短巷道应用经济性不明，制约了方案的理性比选。

针对上述短板，改进创新可沿以下三个方向展开。

1)TBM工法适用性量化评价体系设计。构建涵盖采矿规划符合度、巷道断面适配性、工程水文地质适应性、设备工艺匹配度、工期测算及综合效益评估等多维指标的TBM工法适用性量化评价体系，为TBM工法的科学选用提供系统化的决策框架。

2)全寿命周期经济评价模型构建。建立以全生命周期净现值为核心的经济评价模型，集成直接经济模块、时间价值模块、运营收益模块、风险成本模块及安全成本模块，将提前投产、永临结合等间接收益纳入量化分析。开展多情景敏感性分析，评估TBM方案在矿价波动、地质条件变化等不确定性因素下的经济韧性。同步制定TBM后续处置与综合利用方案，将TBM拆卸、运输及再利用价值纳入全寿命成本收益核算。

3)多方案比选与最佳转换点决策设计。开展TBM与钻爆法多方案模拟比较，综合对比各方案净现值的概率分布，构建基于矿体分布、工期、成本的量化决策模型，以净现值期望值最高且风险可控为原则，明确两种工法的最佳转换点，替代单纯依赖地质条件的经验判断。在前期设计中建立生产风险共担机制以及与达产时间、成本节约挂钩的激励机制，合理分摊设备改造与施工风险。

5　建设施工

TBM在金属矿山应用涉及的建设施工环节，可分解为施工准备、下放组装、掘进作业、拆机运输、配套作业、施工监测、维修保养、复杂地质处理八个方面，下文将围绕这八个方面，逐一梳理各自面临的核心问题及改进创新方向。

5.1　施工准备

施工准备的核心问题，主要体现在施工组织设计与施工方案两个层面。

施工组织设计方面，TBM工法与钻爆法在同一矿区作业时缺乏协同作业规范，施工分区不清、工序交叉干扰大，掘支进度与回采计划存在时序冲突，易造成巷道提前掘出闲置或延误回采。

施工方案方面，当前TBM掘进断面均为圆形，与采矿作业所需断面形式存在差异，需依赖二次扩刷与填充工序进行修整，但传统扩刷工艺效率低、精度差，难以实现与掘进工序的同步衔接，导致巷道与后续采矿作业适配性不足，二次修整工程量大。

针对上述短板，改进创新可沿以下两个方向展开。

1)TBM工法与钻爆法协同作业施工工艺研究。聚焦TBM与钻爆法组合施工场景，系统研究两种工法协同作业的施工工艺，明确施工分区划分标准、工序衔接流程与资源配置方案，制定全流程管控要求与进度计划，保障协同作业安全高效推进，充分发挥各自技术优势。

2)TBM异型断面掘进施工工艺研究。针对“平底直墙半圆拱”型巷道断面的施工需求，系统研究异型断面掘进施工工艺及关键技术。在TBM设备掘进圆形断面的基础上，优化扩刷与填充工艺，实现圆弧形侧壁向垂直墙面的一次扩刷成型，同步将圆弧形底部填充修整为平整地面，减少二次修整工程量，提升巷道与采矿作业的适配性。

5.2　下放组装

下放组装的核心问题，主要体现在设备下放及地下组装两个层面。

设备下放方面，运输路径穿越潮湿、多尘的井下环境，常规防护措施难以保障液压、电气接口在运输存储期内不受侵蚀，部件受损风险较高；垂直下放与斜坡道下放对运输装备、尺寸校核及分批调度提出了严格要求，水平运输面临岔口调度复杂、车辆冲突等组织难题。

地下组装方面,组装硐室空间狭小,大型吊装设备施展受限,测量环境差,组装精度难以保障;TBM连接点繁多,组装工序与基础浇筑、管线预埋等交叉作业协同困难。且设备组装与矿山生产共享时空资源,缺乏统一调度机制,易引发相互干扰与工期延误。

针对上述短板,改进创新可沿以下三个方向展开。

1)设备下放施工技术研究。研究垂直下放与斜坡道下放的分批运输方案,按组装顺序组织部件下放或运输。研究水平运输路径的信息化调度方法,规划运输时间计划与岔口交通管控方案。研究矿山TBM部件井下运输防护技术,形成标准化防护方案并纳入验收项。

2)地下组装精准控制施工技术研究。研究小型化井下专用吊装设备的选配与激光测距等精密测量技术的应用,建立洞内高精度测量控制网,全程监测主机轴线与水平度。研究分段同步组装方法与管线模块化集成布置工艺,关键部件实施地面预调试,利用PLC自诊断功能辅助排查。在此基础上编制TBM组装标准化作业手册。

3)地下组装协同调度施工组织研究。研究基于数字孪生的组装工序模拟与优化方法,建立现场统一调度中心,实施可视化调度。研究组装作业与矿山生产时空资源的共享协调机制,建立与矿山生产调度部门的联合调度方案,明确作业时段与区域,实现跨部门协同。

5.3 掘进作业

TBM掘进施工流程如图8所示。掘进作业的核心问题,主要体现在参数调控、工况识别与刀具管理三个层面。

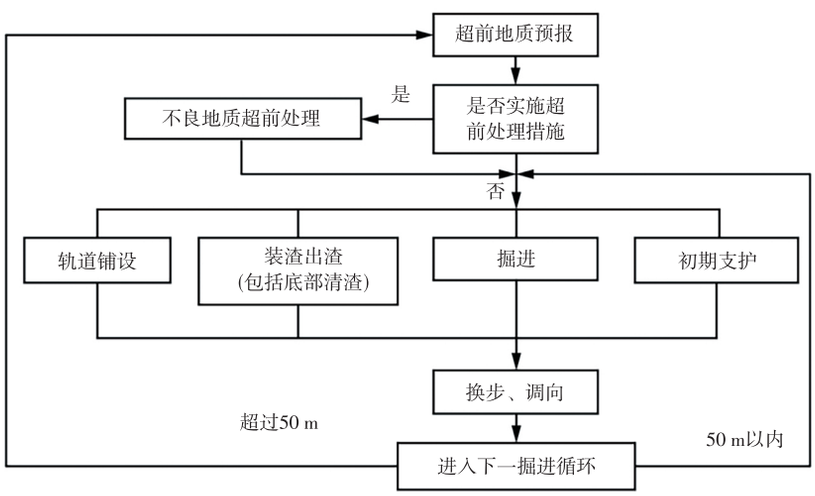


图8 TBM掘进施工流程框图[23]

Fig. 8 Flowchart of the TBM tunneling process[23]

参数调控方面,TBM掘进参数对多变岩性的自适应匹配能力不足,参数调整多依赖人工经验,岩性变化时难以快速响应,不合理的参数设定易导致掘进效率偏低与设备偏载。

工况识别方面,围岩收敛、盾尾间隙变化等隐蔽性状态缺乏实时监测手段,现有传感数据未能有效融合分析,异常工况识别滞后,预警机制不完善,操作决策缺乏系统化预案支撑。

刀具管理方面,刀具磨损程度多依赖人工判定,缺乏标准化换刀流程,换刀时机不合理易影响掘进效率;刀具磨损速度与岩石力学参数之间尚未建立定量关联模型,易导致刀具储备失衡。

针对上述短板,改进创新可沿以下三个方向展开。

1)掘进参数自适应调控技术研究。研究基于扭矩、推力、振动等多源信号实时采集的掘进参数优化方法,利用算法模型自动输出推荐参数集,实现岩性突变时参数调整建议的自动触发。研究刀盘分区域压力调节与转速微调技术,建立岩性-参数匹配模型,实现掘进参数的动态自适应调控。在此基础上编制TBM掘进操作标准化全集,通过每班次数据复盘持续优化参数区间。

2)多源信息融合工况识别与预警技术研究。研究刀盘振动、扭矩等多源传感数据的融合分析方法,基于AI算法识别岩性变化特征,实现异常工况的自动判识与预警信息推送。研究盾尾间隙实时监测的井下部署方案与施工应用方法,建立基于间隙变化

趋势的预警阈值设定标准与分级响应机制。在此基础上制定不同地质风险等级的掘进与支护预案。

3）标准化换刀与刀具管理技术研究。研究基于多源传感的刀具磨损在线检测方法，开发快速辅助查刀系统，实现刀具状态的实时评估。研究狭小空间换刀专用工装配置方案，明确“停机-支护-换刀”标准化步骤，提升换刀作业效率与安全性。研究基于岩石力学参数的刀具磨损预测方法，建立刀具磨损监测台账与储备补给机制，开发刀具管理系统，实现换刀时机的科学判定与刀具储备的动态平衡。

5.4　拆机运输

拆机运输的核心问题，主要体现在贯通接收、洞内拆解与部件提升三个层面。

贯通接收方面，长距离掘进后累积偏差可能使TBM无法精准进入预设拆机硐室，接收基座施工质量与到达段导向测量精度直接影响设备安全接收。

洞内拆解方面，拆机硐室空间受限，大型吊装设备施展困难，拆解后部件临时存放管理不便，易丢失、损坏且影响通风与运输，拆解与运输交叉作业易造成拥堵。

部件提升方面，拆解程度受竖井罐笼尺寸与载重量、斜坡道及水平巷道断面尺寸等多重约束，超大部件竖井上提过程比下放更易摆动，井口卸载场地受限，前期规划不足易导致运输困难或部件损坏。

针对上述短板，改进创新可沿以下三个方向展开。

1）贯通接收施工技术研究。研究到达前最后100 m高频率、高精度导向测量与纠偏技术，加密测量至每掘进1环1次，必要时采用人工测量复核，控制到达速度并实时监测盾体姿态。研究接收基座专项施工方法，进行承载力验算与验收，确保强度、平整度与轴线精度，实现设备安全接收。

2）洞内拆解施工技术研究。研究按“后配套-主机-刀盘”逆向顺序的拆解施工方法，预留运输通道，定制洞内龙门吊与液压顶推工装替代大型起重机。研究刀盘分瓣拆解工艺与法兰面耐磨防护措施。研究井下拆机部件临时存放的数字化管理方法，绘制《井下拆机部件临时存放总平面图》，实行“一位一码”管理，实现部件定位、防护与通风运输的协调。

3）部件提升施工技术研究。研究基于竖井罐笼参数的部件二次拆分方法，单重控制在额定值80%以内。研究基于BIM的运输路径模拟方法，对转弯处实施扩挖避让，采用胶轮车配合智能调度避免井下交汇等待。研究超大件竖井上提专用稳罐与防摆装置，严格控制提升速度，制定专项安全方案并进行空载模拟演练。

5.5　配套作业

配套作业的核心问题，主要体现在出渣衔接、铺底回填及长距离配套保障三个层面。

出渣衔接方面，连续皮带机对复杂线路适应性不足，有轨或无轨运输车编组复杂，运输节奏难以匹配TBM高峰出渣强度，易导致渣仓满仓、TBM被迫停机。

铺底回填方面，当前TBM掘进断面为圆形，与采矿作业所需断面形式存在差异，后续需进行铺底回填，而铺底作业与掘进分步实施，工序衔接耗时长，且未兼顾运输系统永临结合与废石资源化利用的需求。

长距离配套保障方面，长距离工况下支护、通风、供电、排水等系统性能沿程衰减，物料供应、人员通勤及多类型运输调度等组织协调难度显著增大。

针对上述短板，改进创新可沿以下三个方向展开。

1）出渣系统高效衔接施工技术研究。研究连续皮带机与矿卡分段接力出渣的施工组织方法，长距离直线段采用连续皮带机，转弯及复杂线段切换矿卡出渣。研究皮带机速度与刀盘转速联动调节方法，在井下合适位置设置渣仓或利用废弃巷道作为临时储渣场，通过调度平峰填谷，匹配TBM高峰出渣强度。制定大块石处理预案与皮带机卡料、断裂等专项应急预案，沿线设置火灾自动报警和灭火装置。

2）TBM掘进同步铺底施工工艺研究。基于巷道掘进与铺底协同推进需求，研究同步铺底、水沟施作、道路铺设的标准化工艺流程与核心技术参数，将施工期临时道路及排水沟与永久运输路面及排水系统统一设计、一次成型，减少工序衔接耗时与重复工程量。

3）长距离配套作业施工组织技术研究。针对长距离工况下各保障系统性能衰减与运输组织协调难题，系统研究涵盖排水、通风、供电、物料供应、人员通勤及运输调度的综合施工组织方法。在排水与通风方面，研究多级排水衔接与应急排水方案，以及供回风与中继通风系统施工布局；在供电方面，研究驱动布置与电压补偿施工方案；在物料与运输方面，研究支护材料供需动态匹配机制与人员通勤组织方案，建立多类型运输协同调度方法，设置错车硐室并明确行驶优先级，形成覆盖各保障系统的长距离配套

作业施工组织体系。

5.6 施工监测

施工监测的核心问题,主要体现在围岩监测、设备监测与决策转化三个层面。

围岩监测方面,常规点式监测测点间隔大、数据离散,难以全面掌握TBM通过后围岩的时空演化规律,对高能岩爆缺乏有效预警手段,监测点易在灾害中损毁。

设备监测方面,主轴承、变速箱等核心部件早期故障征兆难以捕捉,后配套连续运行设备健康状况存在监测盲区,设备健康状态评估缺乏量化标准,剩余寿命评估多依赖经验,易导致过度维修或突发故障。

决策转化方面,海量监测数据未能有效转化为施工决策指令,故障预警与维修脱节,状态判断仍依赖个人经验,响应滞后;振动频谱、油液分析等专业数据解读门槛高,现场人员难以直接应用。

针对上述短板,改进创新可沿以下三个方向展开。

1)围岩稳定性监测技术研究。依据地质条件与支护形式选取代表性洞段,研究监测断面的布设方法与测点布置方案。研究围岩内部变形、收敛、顶拱下沉及支护变形的现场监测方法,以及涌水量、地下水位与孔隙水压力的渗流监测方案。敞开式TBM重点监测一次支护应力应变,护盾式TBM重点监测管片受力与内部应力。研究监测数据与支护参数调整的现场联动机制,实现围岩稳定性的动态评估与施工响应。

2)设备在线监测技术研究。研究主轴承、刀盘等核心部件在线振动与温度监测的现场部署方案,研究关键辅助设备低功耗无线温振传感器与定点麦克风阵列的安装布设方法,融合掘进参数实现多源数据同步采集。制定传感器选型与维护标准,采用光纤、工业环网等抗干扰传输方案,建设井下工业环网,保障监测信号稳定可靠传输。

3)设备智能诊断与决策转化技术研究。基于在线监测数据,利用AI算法识别故障特征,建立故障诊断模型,设定多级预警阈值,超标自动推送维修工单。定期开展液压油污染度与磨粒分析,构建部件寿命预测模型,实现健康状态量化评估。建立监测数据与维修保养的联动机制,形成可视化设备健康诊断报告,明确问题部位、严重程度与建议措施,降低现场人员专业解读门槛。

5.7 维修保养

维修保养的核心问题,主要体现在换件决策、维修作业与保养执行三个层面。

换件决策方面,配件更换周期多依赖经验,缺乏基于设备状态的预测依据,配件库存与资金占用矛盾突出。

维修作业方面,维修与掘进协同性差,停机挤占掘进时间,维修标准不统一,质量波动大;液压、电控等核心系统故障诊断多依赖厂家支持,自主排障能力弱。

保养执行方面,保养项目繁多易遗漏,计划与掘进节奏冲突,执行效果缺乏量化验证手段,流程不到位易引发连锁故障。

针对上述短板,改进创新可沿以下三个方向展开。

1)换件决策与备件管理研究。研究关键部件状态预警与更换标准的制定方法,对更换旧件开展失效分析,持续优化更换周期模型。研究备件分级管理方法,核心件战略储备、通用件按需采购,开发备件智能化管理系统,实现库存动态预警与补给联动。

2)模块化维修施工技术研究。研究适配驱动部件、刀盘、刀具等部件的模块化维修工装配置方案,推行“维修四单制”(工单-检测单-验收单-追溯单)标准化流程,关键焊缝采用超声波探伤验收。构建典型故障案例库与标准维修作业包,将故障现象、原因、步骤、标准制成故障代码卡指导现场作业,提升自主排障能力。

3)保养刚性执行技术研究。编制TBM全系统预防性维护手册,明确各子系统日、周、月、季度保养项目。研究保养计划与生产计划的刚性融合方法,利用信息化系统自动生成保养工单并纳入流程强制流转。建立保养电子档案,关联掘进参数与设备状态,保养后,对比运行数据,评估执行效果,形成保养质量闭环。

5.8 复杂地质处理

复杂地质处理的核心问题,主要体现在不良地质处置与卡机应急脱困两个层面。

不良地质处置方面,构造破碎带围岩易失稳坍塌,支护滞后、清渣不彻底,刀盘卡滞风险高;高压涌水易导致密封失效与设备水淹,动水条件下止水困难;高应力硬岩段岩爆预警精度低,常规支护难以抵抗冲击;软岩大变形易挤压盾体造成卡机;高地温、有害气体及岩溶空腔等特殊环境缺乏系统高效的处置措施。

卡机应急脱困方面，刀盘卡滞、护盾抱死等突发工况成因复杂，缺乏快速排查方法与分级处置标准，脱困作业流程有待规范，应急处置能力不足。

针对上述短板，改进创新可沿以下两个方向展开。

1）不良地质段处置施工工艺研究。针对断层破碎带、岩溶发育、裂隙富水、软岩大变形、高地应力等不良地质条件，以及高地温、高温热液、有害气体、放射性物质等特殊作业环境，研究覆盖超前预报、超前处置、掘进操作、辅助保障等全环节的施工工艺，明确各类不良地质段的针对性处置流程、关键技术参数及安全保障措施，形成系统化、标准化的不良地质处置施工工艺及关键技术全集。

2）卡机应急处置脱困技术研究。针对TBM施工过程中可能出现的刀盘卡滞、护盾抱死、整机被困等卡机工况，研究卡机成因快速排查方法与风险等级评估标准，建立分级应急处置技术路径与安全保障措施，明确脱困作业标准化流程及后期设备修复方案，最大限度降低设备损伤与工期延误风险。

6　配套保障

TBM在金属矿山应用所需的支撑体系，可分解为造价定额、标准规范、人才队伍、商业模式、政策支持五个方面，下文将围绕这五个方面，逐一梳理各自面临的核心问题及改进创新方向。

6.1　造价定额

造价定额的核心问题，主要体现在定额体系、消耗指标、费用构成及计价规则四个层面。

定额体系方面，当前TBM工程造价主要沿用公路、水利行业长大硬岩隧道定额，缺乏金属矿山专用定额体系，与矿山巷道断面小、转弯多、地质复杂、服务年限短的特点不符，直接套用导致造价测算偏差较大。

消耗指标方面，掘进效率、刀具消耗等核心指标多取自硬岩隧道，与矿山破碎矿岩、软硬互层、富水等复杂工况不匹配，测算准确性不足。

费用构成方面，现行定额中矿石转运、局部通风降温、井下排水增容等矿山TBM施工专属子目缺失。

计价规则方面，台班费核算与设备折旧计提多按长大隧道高利用率设定，与矿山TBM井下拆装频繁、单机利用率低、运维成本高的特点不符，摊销规则不合理。

针对上述短板，改进创新可沿以下四个方向展开。

1）专用造价定额编制。结合金属矿山巷道特点，编制金属矿山TBM工程专用造价定额，细化矿山地质分级标准，设置差异化调价系数，明确造价调整流程，建立定额动态更新机制。

2）核心消耗指标修正。开展矿山TBM施工专项调研，采集复杂工况下的掘进效率、刀具消耗、能耗等核心数据，修正现行定额中与矿山实际不符的消耗指标，提升造价测算准确性。

3）专属成本子目补充。新增矿石转运、局部通风降温、井下排水增容等矿山TBM施工专属成本子目，明确取费标准，完善费用构成，填补计价依据空白。

4）计价摊销规则优化。结合矿山TBM井下拆装频繁、单机利用率低的特点，调整台班费核算与设备折旧计提方式，优化TBM设备摊销规则，探索灵活的设备摊销模式，真实反映TBM方案的经济性。

6.2　标准规范

标准规范的核心问题，主要体现在标准体系、标准内容及标准可执行性三个层面。

标准体系方面，现有标准规范主要针对公路、铁路、水利等领域长大隧道编制，缺乏金属矿山TBM专项标准体系，井下破碎岩层掘进控制、岩爆防控等矿山特有关键环节存在标准覆盖盲区。

标准内容方面，现有标准规范更新滞后，新技术未及时纳入，部分条款沿用传统隧道施工理念，与工程实际脱节。

标准可执行性方面，现有TBM相关标准条款多为通用原则，缺乏细化内容，未明确具体执行流程与检验方法，可操作性不足。

针对上述短板，改进创新可沿以下三个方向展开。

1）专项标准体系构建。聚焦金属矿山TBM工程全生命周期，编制涵盖设备选型、掘进控制、支护施工、运维管理、安全防控、质量验收等全流程的专项标准，填补关键环节标准空白。

2）标准内容动态更新。紧跟矿山TBM技术迭代步伐，将小型化矿用TBM设备、高效掘进工艺、智能化监测等新技术纳入标准规范，淘汰脱节条款。

3）标准可操作性提升。细化标准条款，针对不同矿岩条件与巷道类型，制定差异化要求，明确具体执行流程、检验方法与判定标准，增强标准的针对性与可操作性。

6.3　人才队伍

人才队伍的核心问题，主要体现在层级结构、培

养体系及留存保障三个层面。

层级结构方面,金属矿山TBM应用起步较晚,兼具设备操作与矿山施工经验的复合型人才储备不足;基层操作人员技能水平参差不齐,高端技术研发与全流程管理人才短缺,层级分布失衡,难以满足规模化应用需求。

培养体系方面,高校课程多聚焦通用隧道TBM技术,与矿山特有工况脱节;企业内部培训以短期实操为主,缺乏系统理论支撑,培训师资多来自隧道领域,对矿山TBM施工特点了解有限。

留存保障方面,井下作业环境恶劣、劳动强度大、安全风险高,与地面隧道工程差距明显,人才流失率偏高。

针对上述短板,改进创新可沿以下三个方向展开。

1)人才梯队建设。建立与技能水平挂钩的岗位认证体系,扩大技能人才规模;重点引进和培育统筹矿山全流程的管理人才及适配矿山特有工况的技术研发人才,优化层级分布结构。

2)系统化培养体系构建。推动高校增设矿山针对性课程,实现培养内容与工程需求衔接。构建“理论授课+实操训练+现场实训”的企业培训体系,组建熟悉矿山TBM施工特点的专业师资队伍,强化重大风险识别与应急处置等专项培训。

3)人才留存保障机制强化。改善井下作业条件,提升安全防护水平。完善薪酬激励机制,健全职业发展通道,降低人才流失率,增强行业吸引力。

6.4 商业模式

商业模式的核心问题,主要体现在收益与风险机制、产业链协同两个层面。

收益与风险机制方面,TBM项目前期投入大,掘进效率受地质条件影响显著,收益不确定性较强,缺乏科学的投资回报测算机制;投资风险多集中于业主或施工方单一主体,未形成多方协同的风险分担机制。

产业链协同方面,设备研发、采购、施工、运维、资源回收等环节相互割裂,缺乏产业链协同机制,运营效率偏低。

针对上述短板,改进创新可沿以下三个方向展开。

1)收益与风险机制健全。建立科学的TBM工程投资回报测算体系,构建业主、施工方、设备供应商等多方协同的风险分担机制,降低单一主体投资压力。

2)产业链协同合作机制强化。推动设备供应商、施工企业、运维单位建立长期稳定的合作机制,实现设备共享、技术互补与资源优化配置,提升工程整体运营效率。

3)多元化商业模式创新。探索“设备+服务”一体化、EPC总承包等多元承包模式,发展由矿山企业、施工企业、设备制造商共同参与的租赁、融资租赁等多元商业模式,降低运营成本,提升工程经济性与可持续性。

6.5 政策支持

政策支持的核心问题,主要体现在政策体系、配套扶持及政策协同三个层面。

政策体系方面,现有政策多聚焦于矿山智能化建设或隧道工程TBM应用,缺乏金属矿山TBM工程专项政策,现有政策多为通用性引导条款,对设备研发、施工应用、技术推广等针对性支持不足。

配套扶持方面,TBM项目前期资金压力较大,缺乏针对性的财政补贴、税收减免、金融支持等实质性扶持政策。

政策协同方面,金属矿山TBM工程涉及矿山安全、产业升级、科技创新、财政金融等多个领域,各领域相关政策缺乏有效衔接,存在条款冲突、要求不一的问题。

针对上述短板,改进创新可沿以下三个方向展开。

1)专项政策体系构建。呼吁出台金属矿山TBM工程专项政策,聚焦设备研发、施工应用、技术推广、人才培养、安全监管等关键环节,明确政策导向和支持重点。

2)配套扶持政策完善。呼吁出台针对TBM项目的财政补贴与税收减免政策,优化金融支持服务,降低企业前期资金压力。

3)政策协同衔接强化。呼吁建立跨部门政策协同机制,梳理矿山安全、产业升级、科技创新、财政金融等领域相关政策,解决条款冲突与协同不足的问题,形成政策合力,确保政策落地见效。

7 总结与展望

本文系统梳理了TBM应用于金属矿山面临的关键问题与技术需求,围绕装备研制、设计建造、建设施工、配套保障四大板块,构建了覆盖全生命周期的综合性研究框架。研究认为,金属矿山TBM应用必

须立足矿山整体系统，以适应性装备为基础、协同化设计为纽带、精细化施工为抓手、制度化保障为支撑，四者有机衔接，进行一体化推进。

展望未来，金属矿山TBM应用研究应沿着“装备-设计-施工-保障”四条主线协同攻关：在装备层面，重点突破紧凑型整机、探处一体化、异型断面掘进及模块化配置等关键技术；在设计层面，着力完善地质适应性评价、选型量化匹配及全寿命经济评价方法；在施工层面，系统研究高效支护、出渣衔接、同步铺底及长距离配套作业等施工技术；在保障层面，加快构建专用造价定额、专项标准规范、复合型人才培养及多元商业模式等制度体系。通过持续的系统性创新，全面提升TBM在金属矿山的适用性、可靠性与经济性，助力金属矿产资源安全、高效、绿色开发。

参　考　文　献

[1] 蔡美峰，谭文辉，吴星辉，等. 金属矿山深部智能开采现状及其发展策略[J]. 中国有色金属学报，2021，31(11)：3409-3421.
Cai Meifeng，Tan Wenhui，Wu Xinghui，et al. Current situation and development strategy of deep intelligent mining in metal mines[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals，2021，31(11)：3409-3421.

[2] 吴爱祥，王勇，张敏哲，等. 金属矿山地下开采关键技术新进展与展望[J]. 金属矿山，2021，50(1)：1-13.
Wu Aixiang，Wang Yong，Zhang Minzhe，et al. New development and prospect of key technology in underground mining of metal mines[J]. Metal Mine，2021，50(1)：1-13.

[3] 杨小聪，黄丹，岳小磊，等. 非煤矿山机械连续采矿技术研究进展与发展趋势[J]. 有色金属(矿山部分)，2024，76(6)：1-24.
Yang Xiaocong，Huang Dan，Yue Xiaolei，et al. Research progress and development trend of continuous mechanical mining technology in non-coal mine[J]. Nonferrous Metals (Mining Section)，2024，76(6)：1-24.

[4] 李勇，陈虎忠，朱航宇，等. 金属矿山TBM掘进技术的应用与推广[J]. 有色金属(矿山部分)，2024，76(6)：113-118.
Li Yong，Chen Huzhong，Zhu Hangyu，et al. Application and popularization of TBM tunneling technology in metal mines[J]. Nonferrous Metals (Mining Section)，2024，76(6)：113-118.

[5] 刘泉声，潘玉丛，余宏淦，等. 深部金属矿山巷道TBM掘进技术应用现状及研究进展[J]. 有色金属(矿山部分)，2024，76(6)：25-41.
Liu Quansheng，Pan Yucong，Yu Honggan，et al. Application status and research progress of TBM tunnelling technology in deep metal mine roadways[J]. Nonferrous Metals (Mining Section)，2024，76(6)：25-41.

[6] 陈馈，孙振川，李涛. Tbm设计与施工[M]. 北京：人民交通出版社，2018.
Chen Kui，Sun Zhenchuan，Li Tao. TBM design and construction[M]. Beijing：China Communications Press，2018.

[7] 李建斌，龚秋明，刘斌. 隧道掘进机辅助智能化施工技术[M]. 北京：科学出版社，2020.
Li Jianbin，Gong Qiuming，Liu Bin. Auxiliary intelligent construction technology of tunnel boring machine[M]. Beijing：Science Press，2020.

[8] 崔广龙，吴立根. TBM在金属非金属地下矿山的应用前景分析[J]. 采矿技术，2023，23(5)：33-36.
Cui Guanglong，Wu Ligen. Application prospect analysis of TBM in metal and nonmetal underground mines[J]. Mining Technology，2023，23(5)：33-36.

[9] 李建斌. 中国隧道掘进机技术进展与展望[J]. 现代隧道技术，2024，61(2)：178-189.
Li Jianbin. Advances and prospects of tunnel boring machine technology in China[J]. Modern Tunnelling Technology，2024，61(2)：178-189.

[10] 刘彦. 深埋长隧洞Tbm法与钻爆法施工技术经济对比分析[C]//第十二届工程技术管理与数字化转型学术交流会，2025：3.
Liu Yan. Technical and economic comparative analysis of TBM and drill-and-blast construction methods for deep-buried long tunnels[C]//The 12th Academic Exchange Conference on Engineering Technology Management and Digital Transformation，2025：3.

[11] 籍哲羽，刘正宏. 基于地质勘查的有色金属矿成矿规律及找矿方向[J]. 世界有色金属，2024(20)：64-66.
Ji Zheyu，Liu Zhenghong. Mineralization laws and prospecting directions of non-ferrous metal deposits based on geological exploration[J]. World Nonferrous Metals，2024(20)：64-66.

[12] 李彤，郎兴海，李壮，等. 西秦岭造山带青羊峡-上方家山铅锌矿床成矿物质来源：来自S-Pb同位素的制约[J/OL]. 矿物岩石，1-22[2026-10-14]. https://link.cnki.net/urlid/51.1143.TD.20260928.1749.004.
Li Tong，Lang Xinghai，Li Zhuang，et al. Source of ore-forming materials of the Qingyangxia-Shangfangjiashan lead-zinc deposit in the West Qinling orogenic belt：constraints from S-Pb isotopes[J/OL]. Journal of Mineralogy and Petrology，1-22[2026-10-14]. https://link.cnki.net/urlid/51.1143.TD.20260928.1749.004.

[13] 吴钦正，刘兴全，李桂林，等. 我国金属矿山深部开采发展现状及对策研究[J]. 采矿技术，2021，21(5)：23-27.
Wu Qinzheng，Liu Xingquan，Li Guilin，et al. Research on the present situation and countermeasures of deep mining in metal mines in China[J]. Mining Technology，2021，21(5)：23-27.

[14] 周光辉，王晓波，卜俊男，等. 我国金属矿山深部开采综述及展望[J]. 中国有色金属，2025(24)：64-67.
Zhou Guanghui，Wang Xiaobo，Bu Junnan，et al. Summary and prospect of deep mining in metal mines in China[J]. China Nonferrous Metals，2025(24)：64-67.

[15] 黄丹，杨小聪，陈何. TBM在地下金属矿山应用中的发展现状与趋势[J]. 有色金属工程，2019，9(11)：108-121.
Huang Dan，Yang Xiaocong，Chen He. Development status and trend of tunnel boring machine in underground metal mine

application[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2019, 9(11): 108-121.

[16] 王勋. 煤矿用大直径盾构机刀盘磨损检测与维护管理措施分析[J]. 凿岩机械气动工具, 2025, 51(9): 180-182.
Wang Xun. Analysis of wear detection and maintenance management measures for cutterhead in large-diameter shield machine for coal mine[J]. Rock Drilling Machinery & Pneumatic Tools, 2025, 51(9): 180-182.

[17] 李旭辉, 崔浩, 贺文浩, 等. 多类型TBM在长距离深埋复杂地层输水隧洞施工中的难点与对策[J]. 水利技术监督, 2026(10): 331-335.
Li Xuhui, Cui Hao, He Wenhao, et al. Difficulties and countermeasures of multi-type TBM in the construction of long-distance deep-buried water conveyance tunnel in complex strata[J]. Technical Supervision in Water Resources, 2026(10): 331-335.

[18] 李佳隆, 任鑫龙. 某长距离输水隧洞TBM施工排水设计[J]. 内蒙古水利, 2024(12): 11-13.
Li Jialong, Ren Xinlong. Drainage design of TBM construction in a long-distance water conveyance tunnel[J]. Inner Mongolia Water Resources, 2024(12): 11-13.

[19] 钱鹤轩. 长距离输水隧洞TBM施工洞内风、水、电供应设计[J]. 河南科技, 2021, 40(12): 68-70.
Qian Hexuan. Design of wind, water and electricity supply in TBM construction tunnel of long-distance water conveyance tunnel[J]. Henan Science and Technology, 2021, 40(12): 68-70.

[20] 李科祥, 卯申殷, 杨海良, 等. 特长隧道混合式施工通风方案优化研究[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(增刊1): 686-692.
Li Kexiang, Mao Shenyin, Yang Hailiang, et al. Study on optimization of mixed construction ventilation for super long tunnel[J]. Modern Tunnelling Technology, 2020, 57(S1): 686-692.

[21] 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.
Qi Mengxue. Development, current status, and prospects of TBM tunneling technology in China[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(11): 1964-1979.

[22] 陈发兴, 蔡光辉, 胡韬. 浅谈TBM在金属矿山的应用[J]. 有色金属设计, 2021, 48(2): 1-8.
Chen Faxing, Cai Guanghui, Hu Tao. Introduction to TBM application in metal mines[J]. Nonferrous Metals Design, 2021, 48(2): 1-8.

[23] 肖昌明. 敞开式TBM在长距离、小洞径隧洞中穿越断层破碎带施工的关键技术[J]. 建筑机械, 2025(8): 167-171.
Xiao Changming. Key construction technologies for open type TBM in crossing fault fracture zones in long distance and small diameter tunnels[J]. Construction Machinery, 2025(8): 167-171.