doi: 10. 20238/j. issn. 1671-4172. 2026. 06. 022
任志强, 初士俊, 柴慧珍, 等. 深部有色金属矿山TBM工程应用瓶颈及协同优化对策[J]. 有色金属(矿山部分), 2026, 78(6): 225-231.
Ren Zhiqiang, Chu Shijun, Chai Huizhen, et al. Study on bottlenecks and collaborative optimization countermeasures of engineering application for TBM in deep non-ferrous metal mines[J]. Nonferrous Metals(Mining Section), 2026, 78(6): 225-231.

深部有色金属矿山TBM工程应用瓶颈及协同优化对策

任志强[1], 初士俊[2,3], 柴慧珍[2,4], 乐容昌[2], 杨慧云[2]
(1. 沈阳有色冶金设计研究院有限公司, 沈阳 110003;
2. 中国十五冶金建设集团有限公司, 武汉 430075;
3. 中南大学 资源加工与生物工程学院, 长沙 410083;
4. 中南大学 资源与安全工程学院, 长沙 410083)

摘　要: 我国有色金属矿山逐步进入千米级深部开采阶段, 高地应力、高地温、高渗透压、强岩爆、破碎带发育等复杂地质条件凸显, 传统钻爆法存在掘进效率低、围岩扰动剧烈、井下作业环境恶劣、劳动强度大等短板, 难以适配深部井巷规模化建设需求。TBM作为非爆破连续掘进核心装备, 已成为深部有色矿山机械化、智能化掘进的关键技术路径, 国内多座有色金属矿山已开展TBM工程实践并取得阶段性成效, 但受矿山自身工程与地质特征制约, 其规模化推广仍存在多重现实阻碍。本文结合国内外有色矿山TBM实际工程案例, 从施工经济成本、巷道断面形式匹配、设备转运、出渣运输、通风降温、施工排水等方面, 系统分析了TBM在有色金属矿山推广应用面临的各类难题。针对现存问题, 对矿山企业、设备厂家、设计单位、施工单位四个主体提出建议: 矿山企业立足长远、统筹规划; 设备厂家适配矿情、技术攻关; 设计单位融合特点、系统设计; 施工单位融合人才、精细管理。通过协同努力, 推进有色金属矿山TBM应用进程, 推动深部开采建设向高效、安全、环保的方向转变, 为我国有色金属矿业的高质量可持续发展提供坚实的技术支撑。

关键词: 有色金属矿山; 深部开采; TBM; 井巷工程; 应用挑战
中图分类号: TD421. 5; TD853　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1671-4172(2026)06-0225-07

Study on bottlenecks and collaborative optimization countermeasures of engineering application for TBM in deep non-ferrous metal mines

Ren Zhiqiang[1], Chu Shijun[2,3], Chai Huizhen[2,4], Yue Rongchang[2], Yang Huiyun[2]
(1. Shenyang Nonferrous Metallurgy Engineering & Research Institute Co., Ltd., Shenyang 110003, China;
2. China 15th Metallurgical Construction Group Co., Ltd., Wuhan 430075, China;
3. School of Minerals processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, China;
4. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: China's non-ferrous metal mines have gradually entered the stage of deep mining at the kilometer level, accompanied by prominent complicated geological conditions such as high ground stress, high geothermal temperature, high osmotic pressure, strong rockburst and widely developed fractured zones. The traditional drilling and blasting method has obvious drawbacks including low tunneling efficiency, severe disturbance to surrounding rock, harsh underground

收稿日期: 2026-06-24
作者简介: 任志强, 硕士研究生, 研究方向为矿山机械、TBM。
通信作者: 初士俊, 高级工程师, 从事金属矿山非爆机械采掘技术、采选联合技术研究与应用。

working environment and heavy labor intensity, making it unable to satisfy the large-scale construction requirements of deep underground roadways. As the core non-blasting continuous tunneling equipment, Tunnel Boring Machine (TBM) has become a critical technical route for mechanized and intelligent excavation in deep non-ferrous metal mines. A number of domestic non-ferrous metal mines have carried out TBM construction practices and achieved phased results. Nevertheless, restricted by the inherent engineering layout and geological characteristics of mines, multiple practical obstacles still hinder the large-scale popularization of TBM technology in this field. Combined with actual engineering cases of TBM projects in non-ferrous metal mines at home and abroad, this paper systematically analyzes a full range of difficulties encountered during the promotion and application of TBM in non-ferrous metal mines from following aspects such as the construction economic cost control, adaptability between roadway section shapes and TBM structure, the transportation and underground lowering of large TBM components, the matching between mucking and haulage, long-distance ventilation and cooling for deep single-head excavation, as well as the complex construction drainage system. In response to the above existing bottlenecks, targeted suggestions are put forward for four core stakeholders in the whole industrial chain, namely mine enterprises, equipment manufacturers, design institutes and construction enterprises. Mine enterprises shall adopt a long-term strategic vision and conduct overall integrated planning for deep mining projects. Equipment manufacturers shall carry out targeted technical research and development to produce customized TBM equipment and supporting facilities that fully adapt to the complex geological and engineering conditions of non-ferrous metal mines. Design institutes shall integrate the construction characteristics of TBM and the production demands of non-ferrous mines to carry out holistic systematic design. Construction enterprises shall build interdisciplinary talent teams with professionals mastering both mining engineering and TBM operation, and implement refined whole-process on-site management to reduce equipment failure rates and construction risks. Through coordinated joint efforts of all four participants to tackle technical and management challenges together, the application and popularization of TBM in non-ferrous metal mines can be greatly accelerated. The research outcomes can effectively promote the transformation of deep mining construction towards high efficiency, safety and environmental friendliness, and provide solid technical support to boost the high-quality sustainable development of China′s non-ferrous metal mining industry.

Key words: non-ferrous metal mine; deep mining; TBM; roadway engineering; application challenges

我国有色金属矿产资源开采已逐步迈入千米级深部开采阶段，深部高地应力、高地温、高渗透压、强岩爆、破碎带发育等复杂地质条件日益突出，传统钻爆法存在效率低、安全性差、围岩扰动大、作业环境恶劣、劳动强度高等问题，已难以适配深部矿山建设需求[1-2]。在国家“向地球深部进军”战略指导下，大力发展非爆破机械采矿、智能矿山、深部采矿技术，推动矿山建设机械化、自动化、智能化升级，已经成为有色金属矿山未来发展的方向[3-5]。在此背景下，非煤矿山机械连续采矿装备与技术大会、中国国际矿业大会、有色金属矿山TBM发展研讨会等行业会议相继召开，为TBM在有色金属矿山的推广应用提供了政策导向与技术交流平台。

TBM目前主要应用于平巷、斜井、斜坡道等井巷掘进工程，像银珠山铅锌银矿、多宝山铜矿、大中赫锂矿等有色金属矿山都采用了TBM法进行施工并取得了良好的效果，此外竖井TBM也已经开始开展工业试验并投入到矿山竖井建设中。TBM的应用是一项系统工程，从开始引进到完美融入，这一过程中面临着许多的困难，要想让TBM更好的融入到有色金属矿山中并且发挥出更大的作用来，需要设备设计与施工设计双向奔赴，矿山企业与施工单位协力托举，共同为有色金属矿山行业未来发展出一份力。

1 有色金属矿山TBM应用主要挑战

1.1 经济性制约

经济可行性是决定一个矿山井巷工程是否采用TBM工法的重要条件。由于TBM设备本身造价高，短距离巷道使用TBM掘进施工成本相较于钻爆法会高出很多，不仅在于设备自身高昂成本的摊销，还包括因为装拆机原因增加的时间成本、措施硐室施工成本等因素。只有TBM施工路线达到一定距离，TBM掘进施工才能发挥出其高效的特点，距离越长特点越显著，而有色金属矿山巷道短、碎、弯、密，需要勘察设计工作者综合考虑，设计出适合TBM施工的巷道。

应用TBM设备在有色金属矿山巷道施工，其经济性主要体现在以下方面：1）掘进效率高，巷道快速施工完成，矿山越早投产，越早产生经济价值，矿山企业越早获得收益回报；2）施工质量高，对地层扰动小，后期运营维护成本低；3）巷道掘进施工过程中需要的硐室、通风、排水、支护、出渣、照明等设施可以考虑作为日后矿山运营阶段的基础设施，通过永临结合实现工程经济性，这同样需要在设计初期做好

全局考虑。

1.2　掘进断面适配性差

传统有色金属矿山井巷工程的断面形状以直墙拱形为主，直墙拱形断面受力合理，顶部拱形自承能力强，施工方便，成型简单，方便布置轨道、皮带、电缆、风水管路、人行通道等。然而目前能够应用在有色金属矿山行业的TBM，其成型断面形状以圆形为主，虽然断面承力更强、围岩稳定性更好，但断面利用率相对较低，土石方工程量大，且开挖后需进行铺底回填等后续处理工作。为此各设备厂家针对马蹄形断面[6]、(类)矩形断面(图1所示为矩形断面掘进机MDM5000[7]，在Fresnillo 银矿试验应用)等异形全断面硬岩掘进设备开展样机研究，该类设备仅完成小范围试验，整个TBM行业异形全断面掘进机尚未实现规模化工程推广，受破岩效率、设备可靠性、制造成本、矿山配套系统匹配性等多重因素制约，现阶段无法在有色金属矿山井巷工程中得到推广应用。因此，当前国内有色金属矿山TBM工程仍统一采用圆形断面设计方案。

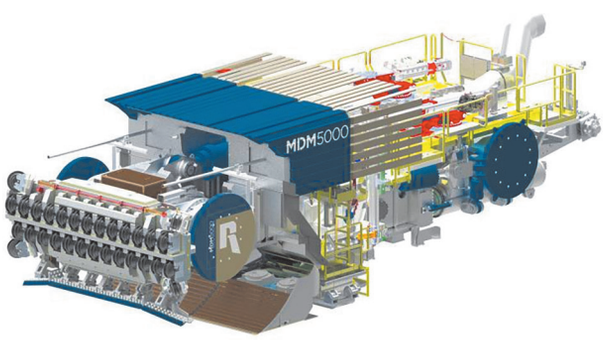


图1　矩形断面掘进机MDM5000

Fig. 1　The rectangular section tunnel boring machine MDM5000

当巷道断面尚未进行规划设计，直接以圆形断面为基础进行断面布置(图2)，不仅要根据巷道在未来生产中的使用用途，考虑巷道内通车尺寸、安全距离等因素，还要考虑TBM施工过程中通风、排水、供电、出渣等设施的布置，同时结合TBM标准化断面尺寸，对巷道断面布置进行规划，对巷道断面尺寸进行设计。

当矿山已经根据传统钻爆法施工方式完成巷道断面设计时，可以在原设计断面的基础上进行断面拟合。在满足TBM施工过程断面需求的前提下，只需要圆形断面完全包住原设计断面或经刷帮回填后能够包住原设计断面即可。

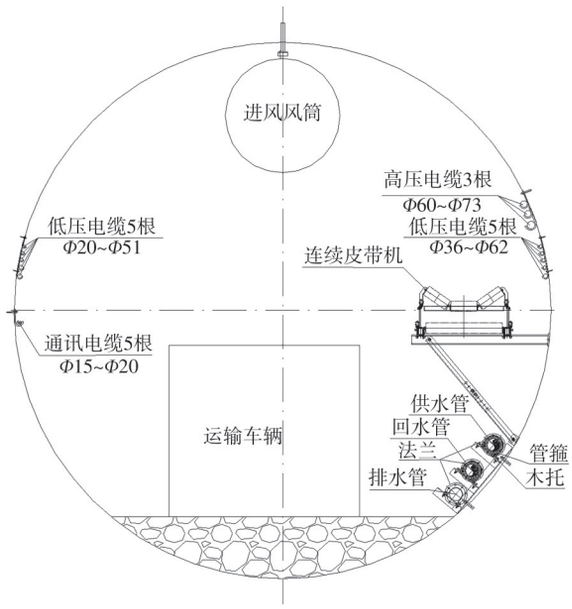


图2　断面布置示意图(单位：mm)

Fig. 2　The schematic diagram of section layout(Unit：mm)

1.3　设备运输下放难度大

TBM设备运输下放主要有三种方式：1)地表拆解后的TBM设备各部件通过副井罐笼运输到地下，在组装硐室进行组装(谦比希铜矿TBM项目采用此方式，如图3所示)；2)地表拆解后的TBM设备各部件通过斜坡道运输到地下，在组装硐室进行组装(银珠山铅锌银矿TBM项目采用此方式)；3)TBM设备在地表组装、步进、始发，通过明挖段斜坡道沿设计规划的既定路线展开巷道掘进工作(多宝山铜钼矿TBM项目[8]采用此方式)。



图3　通过罐笼下放TBM部件

Fig. 3　Lower TBM components through the cage

有色矿山副井断面普遍较小，提升能力有限，通过第一种方法实现TBM设备运输下放需要考虑更多条件，能否完成下放需要在前期仔细核实确认。以

谦比希铜矿为例,其副井为圆形断面,净直径7.2 m,提升容器为非标双层罐笼,罐笼尺寸为长5 600 mm,宽3 000 mm,高8 250 mm(上罐笼高2 950 mm,下罐笼高3 500 mm),罐笼配平衡锤,额定载质量10 t,加配重后最大下放质量15 t。而计划应用于该矿山5.6 m直径TBM,最大件质量约13.7 t,各部件尺寸较大,参数对照见表1。无论是质量还是尺寸大小,对于副井罐笼现有能力都有着不小的挑战。如果设计规划更大断面直径TBM巷道,现有副井罐笼很可能无法完成TBM设备部件下放工作,需要做针对性改造。如果设计之初未能准确确定副井罐笼尺寸及提升能力,很可能造成设备抵达现场后无法顺利下放的问题。

表1 下放运输参数对照表

Table 1 The comparison table of lowering and transportation parameters

参数	质量/t	尺寸/mm
副井罐笼	额定载质量10,加配重后15	长5 600×宽3 000×高8 250(上2 950、下3 500)
TBM部件	最大约13.7	示例:5 500×2 350×2 850,4 630×3 015×1 400 mm,5 250×2 800×2 500

1.4 运输出渣系统不匹配

TBM掘进破岩的同时会产生大量岩渣碎石,这些岩渣碎石如果不能及时处理将会影响后续施工的顺利进行。出渣的可选方式包括矿卡(无轨胶轮车[9])、有轨电机车(蓄电池式、架线式)、连续皮带机[10]等,其中使用连续皮带机出渣在长距离掘进中更能满足出渣连续性需求,从而保障掘进效率。

连续皮带机在有色金属矿山TBM工程中的应用也存在着一些问题。结合各连续皮带机厂家曾经提供过的设计方案及应用案例,连续皮带机的转弯能力尚不能完美适配TBM的转弯能力。有色金属矿山巷道转弯多、转弯半径小,这会对连续皮带机的设计及其生产运行中的故障率等方面产生重大影响,在线路规划时,如果只考虑TBM设备本身的转弯能力而不考虑连续皮带机,往往会在后面因为选择使用连续皮带机出渣,而不得不对原有设计进行变更。

此外,对于连续皮带机在巷道内的布置也存在着不同的见解,当一条TBM掘进巷道多次出现同一方向转弯或者某一方向转弯次数较多时,就会出现连续皮带机布置在巷道内侧还是外侧的选择。一种观点认为,布置在巷道外侧,这样在转弯时相当于增加了转弯半径,降低了连续皮带机通过转弯段的难度,但实际增加的转弯半径大小有限;另一种观点认为,布置在巷道内侧,这样一旦出现翻带问题,岩渣碎石会向岩壁一侧倾覆,从安全角度讲对于人员安全提供了一定的保障。两种观点有待施工单位在实际工程中进行验证,但无论是布置在内侧还是外侧都需要在设备设计制造之初确定下来,因为连续皮带机与TBM设备后配套皮带机之间存在接口,设备设计制造后,难以更改。

1.5 长距离通风降温困难

在有色金属矿山应用TBM,为了更好的发挥出TBM的优势,往往需要面对长距离独头掘进的问题,根据资料显示,独头巷道有效通风临界距离为7 m,超过7 m时需要采取局部通风措施改善作业环境[11]。随着TBM在地下掘进深度的增加,地温也会随之升高,从而形成高地温难题,资料显示,千米深矿井围岩温度高达40~50 ℃。此外,由于氧化放热、机械设备散热、空气压缩热、人体散热等因素,巷道内温度很难满足《金属非金属矿山安全规程》对于人员连续作业场所温度27 ℃的要求[12],降低巷道内环境温度成为不得不解决的问题。

长距离独头掘进通风,需根据工作面允许最低风速、施工作业人员所需风量、废气稀释所需风量等因素确定最小需风量,需要考虑沿程阻力损失、局部阻力损失等因素确定通风压力需求。除采用压入式通风结合抽出式通风外,需要结合利用其它巷道及通风竖井,与矿山整体通风系统联通,形成更好的通风条件。

为应对深地高温环境,除保证通风系统满足要求外,还有必要采取针对性措施保障施工环境适宜。考虑通过采用隔热风筒减少风筒内空气冷能损失;通过低温水喷淋风筒等方式降低风筒和掘进巷空气温度;通过可移动式局部隔热层隔绝工作面附近巷道两侧及顶部围岩散热;通过局部制冷降温系统降低通向工作面的风温等[13-16]。

1.6 排水系统复杂

施工排水是影响TBM掘进效率的重要因素之一,排水不畅可能会导致施工场地积水,影响施工机械的正常作业,一旦发生瞬时大量涌水而无法通过排水系统及时排出,很可能导致淹机停工甚至发生围岩软化、坍塌等安全事故[17]。

TBM掘进巷道排水设计排水系统总排水量包含巷道突涌水、已掘进段渗涌水、生产用废水等。根据有色金属矿山有关规范的要求,工作水泵应能在20 h

内排出一昼夜的正常涌水量；除检修泵外的其他水泵应能在20 h内排出一昼夜的最大涌水量。

水泵的选型与涌水量和排水扬程密切相关。当TBM掘进巷道为平巷，坡度一般仅为3‰左右，垂直高度差较小，掘进距离较长时，影响水泵扬程选择的主要因素为管路中的沿程阻力损失和局部阻力损失，根据涌水量选择合适的水泵后，往往建立1～2个泵站即可满足排水需求。当TBM掘进斜井或斜坡道，如果为上坡掘进，需要先把设备运到地下，涌水可自流汇集到矿山排水系统统一排水；如果顺坡掘进，反坡排水，垂直高度差大，需采取分级排水方式逐级强制抽排[18-19]，分级临时排水仓水泵一般需要与TBM水泵相匹配，另选取合适位置施作固定泵站，待施作完成后可取消前置临时排水仓(图4)。

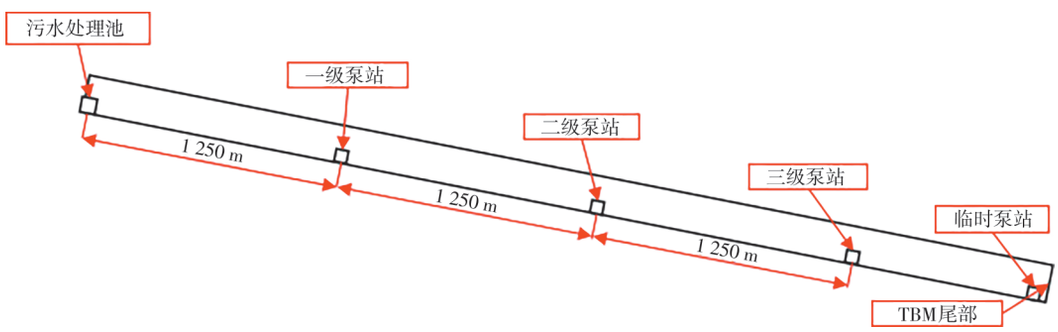


图4　TBM施工多级排水泵站示意图

Fig. 4　The schematic diagram of multi-stage drainage pump station for TBM construction

1.7　其它问题与挑战

1)供电照明存在制式差异

国内外矿山由于电网标准体系不同，电压等级可能存在差异，例如国内矿山地面/井下高压配电通常为10 kV，而赞比亚矿山高压配电通常为11 kV。国内设备出口到国外使用，往往需要特殊定制，从而使成本与复杂度增加，无论是对设计还是施工都会产生一定影响。

2)地勘资料不足

深部矿体埋深大，地质复杂，无临近巷道，传统的勘探手段难以获取到连续高精度的TBM掘进沿线地质数据。而地勘资料不足，直接影响到TBM设备选型、设计和施工，影响到路线选择、排水方案等工程设计，为应对可能出现的不良地质往往需要增加相应配置，易导致冗余设计，增加成本和复杂度。

3)特殊地质条件

TBM对于地质条件的敏感性较高，在硬岩均质岩体中能够实现高效掘进，极大程度的发挥出TBM法的优势。而在断层破碎带、软岩、高地应力、强岩爆、突涌水等复杂地质条件下，容易发生卡机、刀具异常磨损、支护失效等问题，导致掘进效率大幅下降，甚至被迫停工采取针对性措施。

4)缺少矿山＋TBM复合型人才

TBM本身就是集机械、电气、液压、信息、自动化等技术于一体的大型复杂设备，其本身就需要具备跨学科知识的复合型人才。当TBM引入有色金属矿山领域，还要求从业人员对矿山地质、井巷工程、采矿工艺、矿山安全等专业知识有足够认识和了解。矿山企业、设备厂家、设计单位、施工单位均面临严重的复合型人才缺口，亟需既懂矿山工程又懂TBM技术的专业人才。

2　有色金属矿山TBM工程应用优化对策

2.1　矿山企业：立足长远、统筹规划

矿山企业需要突破短期成本思维，立足深部矿山长期发展，放长眼光打开格局，形成规模化、智能化、绿色化一体化矿山。加大深部地质勘察投入，提高地质资料精度，为工程设计与设备设计提供精确保障；预留自动化改造空间，适配后期智能化升级；培养矿山＋TBM复合型管理人才以及自动化、智能化技术人才，保障TBM施工优势并为矿山未来发展储备人才；统筹临时施工设施与永久生产系统结合，推动通风、排水、供电、运输等系统永临结合复用，从整体上降低TBM施工成本同时节约矿山建设投产时间。

2.2　设备厂家：适配矿情、技术攻关

设备厂家需要在传统交通、水利、煤矿行业TBM设备基础上做出突破，研发符合有色金属矿山行业生产建设需求的专用设备。开发小直径、小转弯、短机身、模块化、轻量化TBM，同时研发与TBM相匹

配的小转弯连续皮带机,更好地满足TBM在有色金属矿山下井运输及高效使用的需求;加快直墙拱形、马蹄形等异型断面TBM设备研发,力求目标巷道断面一次成型的同时提高掘进巷道断面利用率;强化TBM破岩、支护、防卡机、探水治水、降温等能力,提升对于高地应力、高地温、高渗透性、岩爆等有色金属矿山深部掘进复杂地质情况的处置能力;提升自动化、智能化水平,满足未来矿山发展需要。

2.3 设计单位:特点融合、系统设计

设计单位需要对现有TBM施工项目展开深入调研,积累矿山TBM法相关经验,充分了解TBM法施工最新技术参数,包括TBM刀具破岩能力、TBM小转弯半径、连续皮带机转弯能力等。在设计过程中,把有色金属矿山特点和TBM法施工特点有机结合,综合考虑施工与生产需求,兼顾功能、安全与成本,优化设计圆形断面布置方案;合理设计规划施工线路,多直线、少转弯并合理设置转弯半径,充分发挥TBM法优势。从矿山未来整体规划出发,开展系统性设计,结合TBM法与钻爆法施工特点,以TBM掘进为主、钻爆法局部处理为辅,统筹掘进、支护、通风、排水、供电、硐室工程,实现永临结合一体化设计。

2.4 施工单位:融合人才、精细管理

施工单位需要融合有色矿山开采技术与TBM装备施工技术,组建矿山+TBM复合型专业人才团队,实现技术互补,满足有色金属矿山TBM施工需求。强化现场管理,加强施工组织协调,避免因为出渣、支护等某一项工作未能及时完成而影响整体施工进度;针对可能出现的高地温、突涌水、断层破碎带、岩爆等不良地质做好充分的准备,编制合理可行的专项施工方案,保证顺利施工;加强设备日常维护保养,降低故障率,保证设备高效运转,保障施工进度;严格执行安全规程,保障作业环境安全,规范处理岩渣、废水,做好噪音控制,践行绿色矿山理念。

3 结束语

1)国内有色金属矿山进入千米深部开采阶段,高地应力、高地温、岩爆等问题突出,传统钻爆法施工短板明显。TBM作为非爆连续掘进装备已在多家有色矿山试点应用,是推动有色金属矿山深部高效、安全、绿色建设的核心装备,有色金属矿山特有工程与地质条件使其大规模推广存在多重制约。

2)本文梳理出制约有色金属矿山TBM推广应用的几大主要问题:(1)经济性约束;(2)掘进断面适配性差;(3)设备运输下放难度大;(4)运输出渣系统不匹配;(5)长距离通风降温困难;(6)排水系统复杂;(7)其它包括供电照明制式差异、地勘资料不足、特殊地质条件、复合型人才短缺等。

3)针对制约TBM推广应用主要问题,构建矿山企业、设备厂家、设计单位、施工单位四方协同优化体系:(1)矿山企业立足长远、统筹规划,推动永临结合;(2)设备厂家立足矿情,实现技术攻关;(3)设计单位融合有色金属矿山与TBM设备应用特点,完善系统设计;(4)施工单位完成矿山+TBM技术人才融合,实现精细化管理。

4)随着技术进步、经验积累、产业链协同完善,TBM必将在有色金属矿山深部建设中得到更广泛、成熟的应用,为我国有色金属矿产资源安全保障与行业高质量发展提供坚实支撑。

参 考 文 献

[1] 刘立顺,杨小聪,万串串,等. 金属矿山深井开采中的力学问题研究进展[J]. 有色金属(矿山部分),2022,74(4):14-18,25.
Liu Lishun, Yang Xiaocong, Wan Chuanchuan, et al. Research progress on mechanical problems in deep mining of metal mines[J]. Nonferrous Metals(Mining Section), 2022, 74(4): 14-18, 25.

[2] 陈璐,郭利杰,杨小聪. 金属矿深部开采岩爆灾害防控研究进展与工程实践[J]. 矿冶,2024,33(4):482-494,514.
Chen Lu, Guo Lijie, Yang Xiaocong. Research progress and engineering practice of rockburst disaster prevention and control in deep mining of metal mines[J]. Mining and Metallurgy, 2024, 33(4): 482-494, 514.

[3] 蔡美峰,薛鼎龙,任奋华. 金属矿深部开采现状与发展战略[J]. 工程科学学报,2019,41(4):417-426.
Cai Meifeng, Xue Dinglong, Ren Fenhua. Current status and development strategy of metal mines[J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, 41(4): 417-426.

[4] 刘福春,郭钦鹏,熊有为. 金属矿山深部硬岩矿床非爆连续采矿技术及应用[J]. 有色金属(矿山部分),2024,76(6):64-69,83.
Liu Fuchun, Guo Qinpeng, Xiong Youwei. Non-explosive continuous mining technology and application for deep hard rock deposits in metal mines[J]. Nonferrous Metals(Mining Section), 2024, 76(6): 64-69, 83.

[5] 李夕兵,陈祉颖,陈江湛,等. 深部有色金属与地热资源协同开发关键技术进展与展望[J]. 金属矿山,2026,55(1):1-12.
Li Xibing, Chen Zhiying, Chen Jiangzhan, et al. Progress and prospect of the synergistic development of deep non-ferrous metals and geothermal resources[J]. Metal Mine, 2026, 55(1): 1-12.

[6] 刘娇. 马蹄形隧道掘进机刀盘设计探讨[J]. 隧道建设,2017,

37(增刊1)：204-211.
Liu Jiao. Discussion on design of cutterhead of horseshoe-shaped tunnel boring machine[J]. Tunnel Construction, 2017, 37(S1): 204-211.

[7] Ruiz V, Baker T, Ofiara D, et al. Mining TBM performance at a depth of 700 m at the Fresnillo mine, Mexico[M]// Connecting Communities Through Underground Infrastructure. London: CRC Press, 2026: 4470-4477.

[8] 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.

[9] 齐梦学. 多功能胶轮车(MSV)在TBM施工运输中的工程适应性研究[J]. 隧道建设(中英文)，2017，37(11)：1475-1482.
Qi Mengxue. Study of engineering adaptability of multifunctional service vehicle(MSV)to TBM construction transportation[J]. Tunnel Construction, 2017, 37(11): 1475-1482.

[10] 王丽华，穆炜罡，陈永刚，等. 特长TBM隧道连续皮带机参数选取及洞内布设研究[J]. 建筑机械，2024(4)：136-141，146.
Wang Lihua, Mu Weigang, Chen Yonggang, et al. Research on parameter selection and tunnel layout of continuous belt conveyor for extra long TBM tunnel[J]. Construction Machinery, 2024(4): 136-141, 146.

[11] 李晓健，贾敏涛，赵旭，等. 高温深井矿山独头掘进巷道通风降温机理研究[J]. 金属矿山，2024，53(2)：271-275.
Li Xiaojian, Jia Mintao, Zhao Xu, et al. Numerical simulation study on ventilation and cooling of deep mine tunnels[J]. Metal Mine, 2024, 53(2): 271-275.

[12] GB 16423—2020 金属非金属矿山安全规程[S].
GB 16423—2020 Safety regulation for metal and nonmetal mines[S].

[13] 郭忠磊，崔嵛，王春龙. 局部制冷降温技术在井下长距离掘进中的应用[J]. 黄金科学技术，2024，32(5)：916-925.
Guo Zhonglei, Cui Yu, Wang Chunlong. Application of local refrigeration and cooling technology in underground long-distance excavation tunnel[J]. Gold Science and Technology, 2024, 32(5): 916-925.

[14] 赵林海，李宗利，苟晓斌，等. 高温矿井掘进面移动隔热层降温效果研究[J]. 有色金属(中英文)，2025，15(2)：315-324.
Zhao Linhai, Li Zongli, Gou Xiaobin, et al. Study on the cooling effect of moving insulation layer on excavation face of high temperature mine[J]. Nonferrous Metals, 2025, 15(2): 315-324.

[15] 乔红彦. 高地温隧道超长独头施工降温及热环境特征研究[J]. 地下空间与工程学报，2023，19(2)：632-639.
Qiao Hongyan. Research on cooling and thermal environment of super-long single-headed tunnel construction with high ground temperature[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2023, 19(2): 632-639.

[16] 柳静献，李国栋，常德强，等. 矿井降温技术研究进展与展望[J]. 金属矿山，2023，52(7)：18-27.
Liu Jingxian, Li Guodong, Chang Deqiang, et al. Present situation and prospect of mine geothermal hazard control technology[J]. Metal Mine, 2023, 52(7): 18-27.

[17] 赵亚军. 穿越断裂破碎带双洞单线隧道反坡排水设计及应用[J]. 路基工程，2026(2)：176-181.
Zhao Yajun. Design and application of counter-slope drainage system for double-tube single-track tunnel crossing fractured and broken zones[J]. Subgrade Engineering, 2026(2): 176-181.

[18] 邹春华. 煤矿斜井TBM施工长距离反坡排水技术[J]. 国防交通工程与技术，2013，11(3)：11-13，10.
Zou Chunhua. On the long-distance reverse-slope draining techniques for TBM construction in inclined shafts of coal mines[J]. Traffic Engineering and Technology for National Defence, 2013, 11(3): 11-13, 10.

[19] 徐昕，纪鸿朋，徐帅军，等. 长斜井施工期大纵坡反坡排水技术研究[J]. 公路交通科技(应用技术版)，2020，16(7)：40-43.
Xu Xin, Ji Hongpeng, Xu Shuaijun, et al. Study on reverse slope drainage technology of large longitudinal slope during construction of long inclined shaft[J]. Highway Traffic Science and Technology(Applied Technology Edition), 2020, 16(7): 40-43.