

# 超大规模硬岩矿山源头推动 TBM 应用的设计创新与思考

Design Innovation and Reflection on Promoting TBM Application at the Source of Super Large Scale Hard Rock Mines

徐长磊<sup>1</sup>, 刘育明<sup>1</sup>, 邓皓泽<sup>2</sup>, 孙学森<sup>1</sup>

(1. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038; 2. 鞍钢集团矿业有限公司, 辽宁 鞍山 114000)

**摘要:** 西鞍山铁矿是一座超大规模开采矿山, 采用 TBM 施工胶带斜井、斜坡道是该技术在国内地下铁矿山首次应用。TBM 施工与钻爆法施工在勘察、设计和施工等方面均有较大差异, 本文基于应 TBM 施工铁矿井巷工程, 结合设备性能与开拓系统工艺需求, 在斜井线路规划、曲线半径选择、始发场地设计、始发段与接收段支护、正常段支护选型、巷道底板处理、硐门设计形式等开展了应用创新。同时结合项目设计、施工中遇到的问题, 对适用于矿山工程的 TBM 施工勘察技术要求、施工方案的选择及提高 TBM 施工断面利用率进行了分析与探讨。

**关键词:** 硬岩矿山; TBM 应用; 胶带斜井; 斜坡道

**中图分类号:** TD263 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2024)01-0065-07

**Abstract:** The Xi'an Shan Iron Mine is a super large scale mine, and the use of TBM to construct belt slope and ramps is the first application of this technology in domestic underground iron mines. There are significant differences between TBM construction and drilling and blasting construction in terms of exploration, design, and construction. Based on the TBM construction of iron mine shaft engineering, combined with equipment performance and development system process requirements, this article innovates the application of inclined shaft route planning, curve radius selection, starting site design, starting and receiving section support, normal section support selection, roadway floor treatment, and opening design form. At the same time, combined with the problems encountered in project design and construction, an analysis and discussion were conducted on the technical requirements for TBM construction survey applicable to mining engineering, the selection of construction plans, and the improvement of TBM construction section utilization rate.

**Key words:** hard rock mines; TBM construction; belt slope; ramp

## 1 前言

铁矿石是重要的工业基础资源, 保障能力尤为重要, 是经济发展的“压舱石”和“稳定器”, 我国铁精粉的对外依存度常年居高不下, 2016 年以来进口铁矿石维持在 10 亿 t 水平, 2020 年达到最高值 11.7 亿 t; 对外进口依存度高达 75% 以上。在国际形势复杂多变的形势下, 资源安全显得尤为重要。为打破海外矿业寡头对国内钢企供给端的垄断, 实现铁矿石自主可控, 国家发改委联合工信部、财政部等七部委于 2022 年初推出“基石计划”。国内铁矿石虽然资源总量相对丰富, 但可供开发利用的资源短缺。铁矿石资源总体呈现矿石资源品位较低、贫矿多富矿少、大型特大型矿少、

矿石类型复杂难利用的特征。随着浅部露天矿产资源的逐渐枯竭, 向地球深部进军已然成为采矿行业的大势所趋; 近几年来既有露天矿山陆续转为井下开采, 新建的一批大中型矿山几乎全部为地下开采。

随着隧道掘进机制造技术水平与经济国力的不断提高, 国内越来越多工程领域的长大隧道采用 TBM 代替传统的钻爆法施工。TBM 修筑隧道在工期、质量、安全、职业健康等方面的优势明显, 国内的铁路、公路、水利、市政等长大隧道施工已被普遍广泛应用; 煤矿近年来也在斜井、平巷掘进中被广泛推广应用。TBM 是目前技术上最先进的隧道掘进装备, 集破岩、出渣、排渣、支护等功能于

[作者简介] 徐长磊(1982—), 男, 山东阳谷人, 正高级工程师, 主要从事矿山井巷设计、深井井筒装备设计理论研究和项目设计管理等工作。

[引用格式] 徐长磊, 刘育明, 邓皓泽, 等. 超大规模硬岩矿山源头推动 TBM 应用的设计创新与思考[J]. 中国矿山工程, 2024, 53(1): 65-71.

一体,各工序可以协同作业。与钻爆法相比,TBM掘进工法具有安全、高效、环保、有利于围岩稳定性控制和职业健康等优势。近十年来,国内陆续有多个煤矿井巷采用TBM掘进,例如神东矿区补连塔煤矿斜井(2015年)、山东新巨龙煤矿二水平北回风大巷(2019年)、陕西正通煤业高家堡煤矿开拓大巷工程(2020年)、陕西延长石油可可盖煤矿斜井(2021年)、和陕煤集团王峰煤矿瓦斯低抽巷(2023年)等。TBM已成为煤矿巷道快速掘进的一种新方法,已在国内20余座矿井进行了试验应用<sup>[1]</sup>。相比煤矿,金属矿山应用TBM开拓井巷起步较晚,目前仅有多宝山铜矿露天矿石运输胶带斜井(2022年)和巨龙铜多金属矿露天采场排水巷道(2022年)等少数应用。三山岛北部海域金矿辅助斜坡道和沙坪沟钼矿辅助斜坡道计划采用TBM施工,但目前尚未实施。研究TBM在金属非金属矿山应用,对于加快推进矿山建设周期、促进矿山转型发展具有重要行业意义;本项目为国内地下开采铁矿山首例采用TBM建设井巷,对推动金属矿山施工智能化、无人化具有重要示范意义。

## 2 工程背景

西鞍山铁矿建设规模3000万t/年,是国家钢铁行业“基石计划”重点建设项目,建成后将成为世界规模最大的地下充填法开采矿山。西鞍山铁矿采用胶带斜井、副井、辅助斜坡道联合开拓,设有胶带斜井、斜坡道和8条竖井;胶带斜井负责矿石提升,斜坡道是人员、材料下井的主要通道。胶带斜井系统由3段胶带接力组成,倾角均在12°左右,单段胶带的长度1300~1500m,胶带斜井总长4230m。斜坡道全长约6420m,正常直线段坡度15%,弯道段坡度10%,每隔300m左右设50m的缓坡段,缓坡段坡度3%。胶带斜井、斜坡道线路布置如图1所示。西鞍山矿区靠近鞍山城区,地表环境复杂,矿权范围内有铁路、公路、鞍状山峰自然景观和省、市级保护文物等众多环境敏感因素。胶带斜井、斜坡道原计划采用钻爆法施工,项目实施过程中,为减小对环境的影响,加快基建进度,胶带斜井和斜坡道改为采用全断面掘进机TBM(Full Face Rock Tunnel Boring Machine)施工。



图1 胶带斜井、斜坡道线路布置图

## 3 设计创新

西鞍山铁矿采用TBM施工矿山关键工程——胶带斜井、斜坡道,为国内地下开采铁矿山首例,对推动金属矿山施工智能化、无人化具有重要示范意义。同时,也是中国恩菲设计的首个采用TBM施工的项目,TBM施工与钻爆法施工相比,在勘察、设计和施工等方面均有较大差异,项目设计团队进行了多处创新与探索。

### 3.1 斜坡道平曲线、竖曲线

规范规定:斜坡道的平曲线半径应根据运输设备的技术性能和运行速度确定,以卡车运输为主的

斜坡道不宜小于20m,辅助斜坡道不宜小于15m。对于斜坡道的竖曲线,规范规定竖曲线半径宜采用20~25m,当斜坡道的纵坡变更处相邻两个坡度代数差大于10%时,宜设置半径不小于50m的竖曲线<sup>[2]</sup>。上述规定主要考虑斜坡道满足无轨车辆运输的需要,同时也满足钻爆法施工的需要。

斜坡道采用TBM施工时,小半径转弯在TBM结构设计、TBM皮带机出渣、TBM导向等方面都难度较大。常规6~7m护盾式TBM水平转弯半径约为300m,6~7m新型敞开式TBM转弯半径能力可实现50m,新型敞开式TBM主机如图2所

示。山东文登抽水蓄能项目 TBM 直径 3.5 m, 转弯半径为 30 m。西鞍山项目采用新型敞开式 TBM, 可实现水平曲线半径 100 m 和竖曲线半径 300 m 转弯。

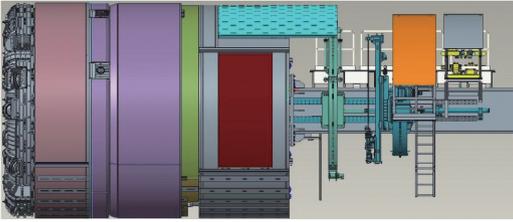


图2 具备锚-网-喷支护功能的新型敞开式 TBM 主机

斜坡道原设计最小平曲线半径 30 m, 不设竖曲线。确定采用 TBM 施工以后, 通过优化调整斜坡道线路, 设计平曲线半径为 200 m, 受矿权范围等限制时, 最小平曲线半径 100 m。变坡处不设竖曲线, 施工时采用竖曲线半径 300 m 圆弧过渡, 过渡段长度约 35 m。综合考虑 TBM 结构及施工效率, 采用 TBM 施工的斜坡道的平曲线半径一般应大于 100 m。设计斜坡道线路时, 在满足使用功能的前提下, 尽量选择直线线路, 减少转弯或以大半径转弯。

### 3.2 TBM 组装与始发场地

根据工程的需要, TBM 组装和始发可以采用地面组装、地面始发模式和硐室组装、井下始发模式。由于 TBM 井下始发需要开凿大断面组装硐室、安装大型吊装设备, 施工难度及工程费用高, 在地面场地能满足 TBM 组装空间时, 优先选用地面始发。

西鞍山斜井项目采用 1 台直径 7.03 m 新型敞开式 TBM 从辅助斜坡道始发, 至胶带斜井洞口接收。TBM 组装从辅助斜坡道地面场地组装, 空推至工作面始发。TBM 总长约 188 m, 总重量约 1 200 t, 主机重量约为 620 t。整机由刀盘、前盾、主驱动、内外伸缩盾、支撑盾、辅助撑靴、主梁、设备桥、喷浆桥、13 节后配套拖车等组成, 其中主机总长约为 16 m (含刀盘、主梁)。为满足 TBM 组装, 需设置安装导台, 长度约 40 m, 宽度 8.5 m, 采用 C35 混凝土浇筑而成, 弧形导台两侧根据实际情况各布置 2 根 43 kg 钢轨一并预埋于导台混凝土内, 用以提供 TBM 行走的支撑力。TBM 长度大, 重量大, 需要采用大型起重机才能完成吊装, 要求组装场地有较大的安装空间, 且为便于始发, 洞口应与场地边墙垂直或呈大角度相交。本项目斜坡道洞口中心线与场地边墙坡脚线夹角为  $72^\circ$ , 在不考虑 TBM 施工时, 斜坡道开口位置可距东侧场地边坡约 25 m 布置, 以节省工业场地

占地, 在考虑 TBM 施工准备要求后, 为便于 TBM 地表组装, 设计将斜坡道口向场地中部平移 5 m, 在总体占地面积不变的条件下, 形成满足组装要求的场地。TBM 组装如图 3 所示。

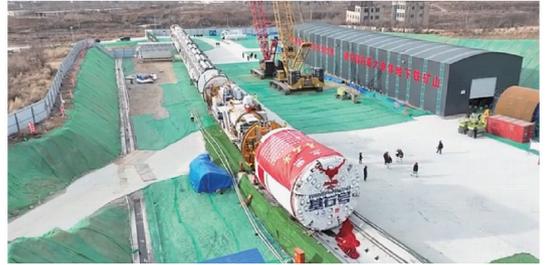


图3 TBM 组装、始发场地

### 3.3 TBM 始发段与接收段支护

根据工勘资料, TBM 始发段与接收段场地地层从上至下依次为: ①耕土; ②全风化花岗混合岩; ③强风化花岗混合岩; ④中风化花岗混合岩。

①耕土(Q4): 黄褐色, 松散, 湿, 主要由黏性土、黏石、植物根系等组成, 厚度 0.50 ~ 1.80 m。

②全风化混合花岗岩( $\gamma_1$ ): 灰褐色, 黄褐色, 结构构造已破坏, 风化物

呈砂状, 手可捏碎, 局部夹岩块。围岩基本质量级别为 V 级, 属极软岩, 岩体极破碎, RQD = 0, 围岩工程质量级别为 V 级, 层厚 0.5 ~ 6.1 m。

③强风化混合花岗岩( $\gamma_1$ ): 灰白色、黄褐色, 中粗粒结构, 块状构造, 主要矿物成分为石英、长石、云母, 节理裂隙很发育, 岩芯呈短柱状、块状, 锤击可碎。围岩基本质量级别为 V 级, 属较软岩, 岩体破碎, 围岩工程质量级别为 V 级, 层厚 7.8 ~ 17.8 m。

④中风化混合花岗岩( $\gamma_1$ ): 灰白色、青灰色, 中粗粒结构, 块状构造, 主要矿物成分为石英、长石、云母, 节理裂隙较发育, 岩芯多呈柱状、长柱状, 局部呈短柱状、块状, 锤击不易碎。岩体破碎 ~ 较破碎, 属于较硬岩, 岩体基本质量等级 IV 级, 局部 V 级, 揭露层厚 7.20 ~ 68.0 m。

各岩层物理力学性质指标见表 1。

对于斜坡道及斜井开口段, 第四系地层、全风化和强风化花岗岩地层需采用钢筋混凝土支护, 支护厚度根据围岩压力计算确定。考虑 TBM 始发导台施工, 设计采用两次支护形式。西鞍山项目斜井开口段由于上部有规划道路, 采取加强支护形式, 采用 200 mm 钢拱架锚喷一次支护 + 600 mm 双层钢筋混凝土二次支护, 长度约 60 m。开口段加强支护如图 4 所示。





图 5 预制仰拱块铺底



图 6 掘进废石回填铺底

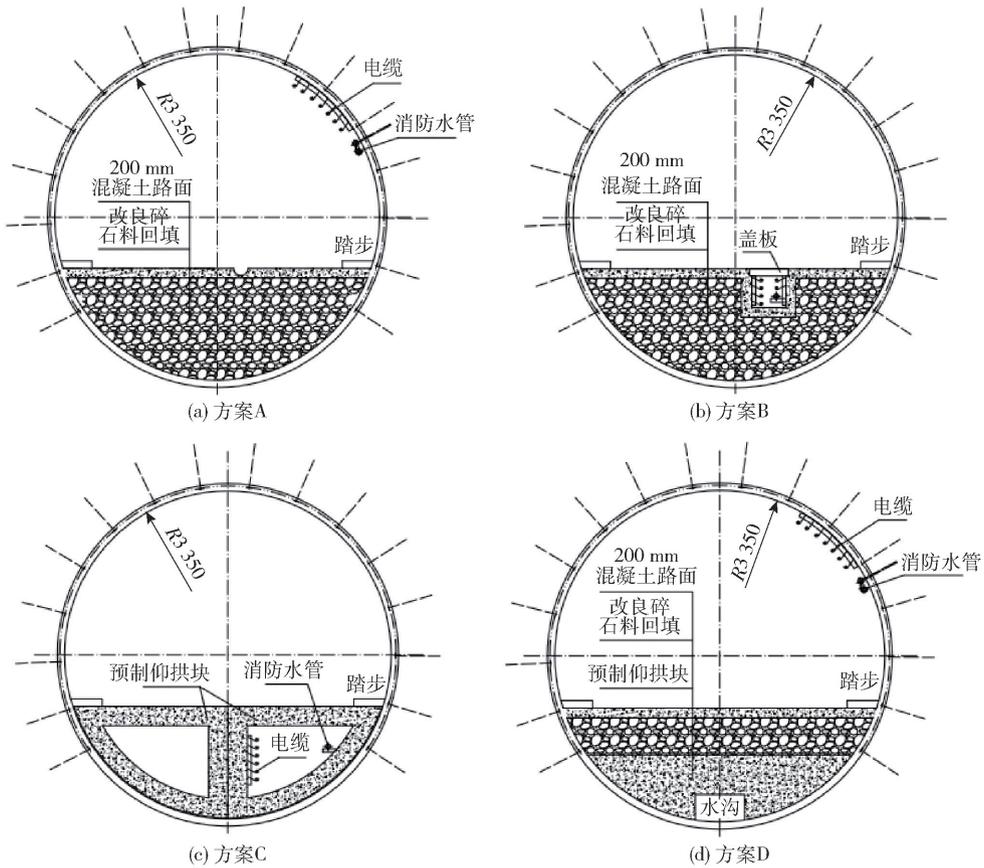


图 7 底板处理方案

斜井底部改良废石回填,上铺 200 mm 混凝土路面,设管缆沟。方案 C,预制中空仰拱块铺底,管缆置于仰拱块内部空间。方案 D,预制中空仰拱块铺底,中

部改良废石回填,上铺 200 mm 混凝土路面,管缆沿井壁敷设。各方案优缺点比较见表 2。

表 2 底板处理方案比较

	优点	缺点
方案 A	费用低、线路检修方便、利用部分废石	施工较复杂
方案 B	费用较低、线缆置于管缆沟内、巷道整洁、利用部分废石	底板先压实、后挖管缆沟、施工复杂、线路检修不便
方案 C	施工便捷、线缆置于管缆沟内、巷道整洁	费用高、线路检修不便
方案 D	施工较便捷、利用部分废石	费用较高、水沟不易清淤

综合比较,考虑节约投资,选择方案A。由于胶带斜井和斜坡道服务年限长,坡度大,且巷道穿越千枚岩占比较大,千枚岩为较软岩,掘进废石回填底板时需添加适量水泥、石灰及速凝剂。

## 4 应用问题探讨

由于采用TBM施工,在胶带斜井和斜坡道设计、施工过程中遇到一些新问题,对解决思路及引发的思考进行总结探讨。

### 4.1 TBM施工对工勘的要求更高

与钻爆法相比,TBM的地质适应性较差,在Ⅱ、Ⅲ级完整围岩条件下TBM的施工速度可以达到钻爆法的4~8倍<sup>[4]</sup>,但不良地质条件下则掘进速度严重降低,甚至出现卡机事故。同时工程地质条件是TBM设备选型的基础,适应不同的地质环境,TBM形成了包括敞开式、单护盾、双护盾、多模式、新型护盾式、超微型等产品型谱。突涌水、软岩大变形、断层破碎带、高地应力等复杂地质条件严重影响TBM工法适用性,TBM选型不当易引起工程问题,且缺乏处理相关风险的有效应对措施。

《铁路工程地质勘察规范》(TB 10012—2019)中,采用TBM施工的隧道工勘主要内容有以下几点:(1)查明影响掘进机的选型及设计和施工的地质条件。(2)初测阶段应初步查明隧道区工程、水文地质条件,为判定隧道工程能否采用掘进机施工提供必要地质依据。(3)定测阶段应查明工程涉及的主要地层岩性和断裂构造发育特征,为掘进机选型、设计及配套设备提供各类定量地质参数,详细划分TBM工作条件等级,明确需要采用钻爆法提前处理的具体段落及长度。(4)洞身埋深小于100m的长大地段,钻孔间距不宜大于500m。洞身埋深较大的地段,钻孔间距应做专门研究。(5)测试项目应包含岩石坚硬程度、磨蚀性及完整性等。

《有色金属矿山井巷工程设计规范》要求工程、水文地质条件复杂的斜井工程应开展工勘地质勘察工作,勘察钻孔应沿斜井轴线布置,其数量不宜少于3个;对斜坡道等采用无轨运输的巷道工勘无明确要求。现行金属矿山相关规范对工勘的要求是考虑钻爆法施工制定的,可满足钻爆法施工斜井、斜坡道和平巷等,但不能满足TBM施工的需要。分析其原因,钻爆法施工灵活,面对不良地质条件可以采取工作注浆、超前管棚等多种措施,对于斜坡道甚至可以

在工作面后退,然后以小半径转弯绕开不良地质体,因此,现行规范对斜井要求少量工勘,斜坡道可以无工勘。TBM设备的转弯半径普遍不小于100m,TBM施工斜坡道遇不良地层时不能后退并转弯以避免不良地质体,施工风险大。对于采用TBM施工的矿山井巷工程,应参照铁路勘察规范并结合矿山工程的特点,制定专门的工勘要求。随着TBM施工在矿山的推广应用,制定适应矿山工程的TBM施工勘察规范也越发迫切。

西鞍山项目由于时间跨度长,早期胶带斜井和斜坡道计划采用钻爆法施工,前期工勘只在胶带斜井沿线布置了11个钻孔,斜坡道没有布设工勘孔。确定采用TBM施工后,通过研究工勘资料,发现胶带斜井工勘基本满足TBM施工要求,但需要补充斜坡道工勘;另外,设计和施工中充分利用前期探矿钻孔资料完善矿山地质模型,满足设计及施工需要。

### 4.2 优化设计给施工方案多种选择

斜坡道和胶带斜井设计过程中,充分考虑TBM施工,设计斜坡道与胶带斜井尾部硐室贯通。由于胶带斜井和斜坡道开口都位于地表,斜坡道尾部有大件道与胶带斜井尾部硐室相连,制定施工方案时可有多种选择。主要方案有3种:方案(1),2台TBM分别从胶带斜井和斜坡道开口段往下掘进;方案(2),采用1台TBM施工,从斜坡道口开始掘进,掘进到底后,TBM在洞内拆解,在胶带斜井口重新组织二次始发;方案(3),采用1台TBM施工,从斜坡道口下掘,斜坡道施工完成后,从胶带斜井底部反坡掘进直至地表。方案优缺点比较见表3。

由于基建期临时供电容量的限制,不能满足2台TBM同时施工,排除方案1。方案3较方案2工期提前5个月,节省费用210万元,通过采取适当技术措施,可消除施工风险,选择方案3。

### 4.3 机械扩挖,提高断面利用率

目前TBM只能进行圆形断面开挖,圆形断面应力集中系数小,强度高,适应于埋深大,地应力高,有冲击地压的工况场合<sup>[5]</sup>。金属矿山岩层相对较好,围岩应力不大,可以在圆形断面的基础上通过机械2次扩挖,改造为拱形巷道,提高断面利用率,断面扩挖如图8所示。对于采用TBM施工的巷道,设计过程中,设计、施工及TBM制造厂商应密切配合,研究TBM配置机械刷帮装置,如潜孔锤等,提高掘进断面利用率。

表3 TBM 施工方案比较

名称	方案(1) 2台TBM分别掘进	方案(2) 1台TBM,洞内拆解,二次始发	方案(3) 1台TBM,一次始发,地表接收
工期	胶带斜井始发至掘进完成320d,洞内拆解、转场40d,共计360d。斜坡道始发至掘进完成480d,洞内拆解、转场40d,共计520d	斜坡道始发至掘进完成480d,洞内拆解、转场70d,地表二次组装90d,胶带斜井掘进320d,洞内拆解、转场40d,共计1000d	斜坡道始发至掘进完成480d,胶带斜井反坡掘进320d,洞内拆解、转场40d,共计840d
可比成本	19386万元	14828万元	14618万元
技术优缺点	缺点:1. 10 kV 变电站不能满足2台TBM供电。2. 两台TBM洞内破坏性拆解。3. 增加连续皮带机的费用。 4. 同时投入两台TBM,费用高。 优点:1. 节省15个月直接费间接费。 2. 不考虑TBM模块化设计	缺点:1. 分两段下坡掘进。2. TBM到达结束里程后,需要开挖迂回导洞至刀盘前方,再开挖拆机洞室,洞室内架拆机门吊,工程量大,施工困难,影响工期。3. 需要2次组装,2次洞内拆除,洞内拆机安全风险高。4. 辅助斜坡道施工完成后需继续保留抽排水设备。5. 不能一次回填到位。 优点:1. 斜坡道巷道可以提前施工,减少交叉作业。2. 洞内通风较独头掘进良好	缺点:1. 存在长距离双回路10 kV供电线路优化问题。2. 增加4.23 km的周转料消耗。3. 增加连续皮带机的费用。4. TBM先下坡后上坡掘进需对TBM做针对性设计。5. 上坡掘进存在最低点涌水关门安全隐患。 优点:1. 节省5个月直接费间接费。 2. 不考虑模块化设计。3. 1次始发,1次拆机

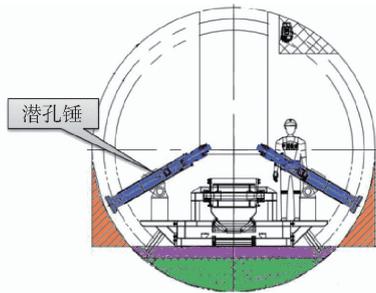


图8 TBM 施工断面二次扩挖

## 5 结论

西鞍山项目是国内地下铁矿山首次创新应用TBM施工矿山关键工程,也是中国恩菲承担设计的首个TBM施工项目,与钻爆法施工相比,在勘察、设计和施工等方面均有较大差异,设计进行了多处创新,主要有斜井线路规划、曲线半径选择、始发场地设计、始发段与接收段支护、正常段支护选型、巷道

底板处理、硐门设计形式等。同时,结合设计、施工中遇到的问题,对适应矿山工程的TBM施工勘察规范、施工方案的选择及提高TBM施工断面利用率进行了分析与探讨。

### [参考文献]

[1] 刘泉声,黄兴,潘玉丛,等. TBM在煤矿巷道掘进中的技术应用和研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1):242-260.

[2] 中国有色金属工业协会. GB 50915—2013 有色金属矿山井巷设计规范[S]. 北京:中国计划出版社,2013.

[3] 杜立杰. 中国TBM施工技术进展、挑战及对策[J]. 隧道建设,2017(9):1063-1075.

[4] 王杜娟,贺飞,王勇,等. 煤矿岩巷全断面掘进机(TBM)及智能化关键技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(6):2031-2044.

[5] 刘文敬,程守业,荆国业. 反井钻机定向钻进过程中的井帮围岩稳定技术研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报,2023,5(2):75-83.