

金属矿山工程中 TBM 设备选型与定制研究

牛雄

中国十五冶金建设集团有限公司, 湖北 武汉 430075

DOI:10.61369/ME.2026040010

摘 要 : 针对金属矿山长距离硬岩巷道开拓施工需求, 为了提高矿山开拓施工效率和机械化水平, 研究了全断面岩石掘进机 (TBM) 的设备选型方法与定制依据。以银珠山铅锌矿开拓工程为依托, 分析其地质水文条件与工期要求, 通过计算推力、刀间距等关键参数进行 TBM 的合理选型, 对 TBM 主机结构与后配套系统进行深入的定制化改造与优化设计。经过针对性选型与定制改造的敞开式 TBM, 能够良好地适应地下金属矿山复杂巷道的施工环境, 显著提升了施工安全性和掘进效率, 对类似地下矿山开拓工程具有重要的参考与指导价值。

关 键 词 : TBM; 金属矿山; 设备选型; 定制改造; 盘型滚刀

Research on the Selection and Customization of TBM Equipment in Metal Mine Engineering

Niu Xiong

China Fifteenth Metallurgical Construction Group Co., Ltd. Wuhan, Hubei 430075

Abstract : To address the construction demands of developing long-distance hard rock roadways in metal mines, and to improve construction efficiency and mechanization levels, this paper studies the equipment selection methods and customization basis for Full-Face Rock Tunnel Boring Machines (TBM). Relying on the development project of the Yinzhusan Lead-Zinc Mine, the geological and hydrological conditions, as well as the schedule requirements, were analyzed. A reasonable selection of the TBM was conducted by calculating key parameters such as thrust and cutter spacing. Furthermore, in-depth customized modifications and optimized designs were carried out on the TBM's main structure and backup system. The open-type TBM, having undergone targeted selection and customized modification, demonstrates excellent adaptability to the complex construction environments of underground metal mine roadways. It significantly enhances construction safety and excavation efficiency, providing valuable reference and guidance for similar underground mine development projects.

Keywords : TBM; metal mine; equipment selection; customized modification; disc cutter

我国矿产资源丰富, 随着经济与科技的迅猛发展, 矿业发展模式逐步由规模扩张向高质量发展转变。在国家政策的指引下, 积极响应“机械化换人、自动化减人、智能化无人”的发展要求, 已成为地下金属矿山在持续发展中所必须直面的重大挑战^[1]。全断面岩石掘进机 (TBM) 作为融合机械、电气、信息化及自动化等多种技术的大型成套装备, 具有连续作业能力强、自动化水平高以及施工效率高等特点。近年来, TBM 在国内迅速发展, 已广泛应用于水利、地铁以及煤矿巷道等地下工程建设领域, 为其进一步推广至金属矿山开拓工程提供了成熟经验和发展契机。

然而, 与常规的水利或交通隧道相比, 地下金属矿山的开拓巷道通常具有空间受促、转弯半径极小、需要连续转弯以及地质断层多变等复杂工况, 常规的 TBM 设备难以直接适用。因此, 针对金属矿山特殊工况开展 TBM 设备的科学选型与针对性定制改造, 是实现其高效应用的关键^[2]。

一、工程概况

银珠山地下金属矿设计采选规模为 100 万 t/a, 部分井巷工程拟采用 TBM 进行掘进施工。施工范围主要包括 -190 m 中段平巷、-140 m 中段平巷以及连接 -190 m 与 -140 m 中段的措施斜坡道, 总长度约为 3600 m, 施工内容涉及小半径转弯 (30 m) 及

上坡掘进等复杂工况。掘进区域围岩以半坚硬至坚硬晶屑凝灰岩为主, 地质构造总体较为简单。矿体围岩类型单一, 岩体完整程度较高, 单轴抗压强度范围约为 40 ~ 110 MPa, 围岩等级主要分布于 III ~ IV 级。地下水来源主要为基岩裂隙含水层, 包括深部裂隙富水带及 F2 断层等部位, 掘进区段整体表现为局部滴水状态, 基本满足 TBM 施工对水文地质条件的要求。

二、TBM设备选型与关键参数

(一) TBM机型选择

TBM是一种集岩石破碎、渣土运输、掘进导向、初期支护以及通风除尘等功能于一体的综合性地下工程装备。依据结构形式及适用工况差异，TBM通常可分为敞开式TBM和护盾式TBM两大类型。

掘进机施工的关键首先是TBM正确选型，掘进机的选型需要解决两个问题：首先是选择合适的掘进机类型，其次是确定合理的掘进机主要技术参数。

(二) 关键参数计算

1. 刀盘选择

对于圆形断面巷道，其理论开挖直径（即刀盘外径）与最终成型巷道直径之间存在一定关系，可按式（1）进行计算：

$$D = D_0 + 2(h_1 + h_2 + h_3) \quad (1)$$

式中：D表示理论开挖直径； D_0 表示成型巷道直径； h_1 表示施工预留变形量，通常为15 cm（其中包括掘进设备施工偏差约5 cm，围岩变形预留约5 cm，以及衬砌施工误差5 cm）； h_2 表示初期支护厚度，一般按10 cm考虑； h_3 为二次支护厚度，其数值通常与二次衬砌厚度相对应，约为30 cm。

根据银珠山勘察的地质情况和围岩类型，巷道成型后基本不需要进行支护，可以不考虑二次支护量，预留变形量及二次支护厚度。

2. 刀具选择

TBM刀盘通常配置背装式盘形滚刀，该结构形式能够使刀具的检查、维修及更换工作在刀盘内部完成，从而提高设备维护效率。滚刀规格的选择需与隧道断面尺寸相匹配，不同掘进直径对应适宜的滚刀尺寸。掘进断面直径与盘形滚刀直径之间的对应关系见表1。

表1 掘进断面直径与盘形滚刀直径的关系

盘形滚刀 直径 / (°)	掘进隧道直径 / m											
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
12												
15												
17												
19												

近年来，随着滚刀设计制造水平不断提高以及岩石破碎理论研究的持续深入，大直径滚刀在硬岩隧道工程中的应用比例逐渐增加。对于大断面硬岩TBM而言，采用较大直径滚刀能够有效提高单刀承载能力和总推力水平，从而增加滚刀对岩体的贯入深度，增强岩石破碎效果。同时，大尺寸滚刀还具有降低磨损速率、减少刀具消耗、延长刀圈使用寿命等优势，可有效降低工程施工成本。由于换刀次数减少，设备停机时间得以缩短，进一步提高了TBM的连续作业能力和整体施工效率。

3. 刀具布置设计

从理论分析角度来看，滚刀间距参数受多种因素共同影响，主要包括岩石种类、力学性能指标以及岩体节理裂隙发育情况

等。当工程地层条件已经明确时，通常能够根据相关试验成果和工程经验确定较合理的刀间距范围，并据此开展刀具布置设计。

依据盘形滚刀破岩理论以及美国科罗拉多矿业学院提出的滚刀推力计算模型，滚刀破岩所需总推力 F_V 可按下式进行计算：

$$F_V = D_1^{0.5} h^{1.5} \left[\frac{4}{3} \sigma_c + 2\tau \left(\frac{S}{h} - 2 \tan \frac{\varepsilon}{2} \right) \right] \tan \frac{\varepsilon}{2} \quad (2)$$

由此确定滚刀平均刀具间距S为：

$$S = 2h \tan \frac{\varepsilon}{2} + \left(\frac{F_V}{D_1^{0.5} h^{1.5} \tan \frac{\varepsilon}{2}} - \frac{4}{3} \sigma_c \right) \frac{h}{2\tau} \quad (3)$$

式中： σ_c 表示岩石单轴抗压强度， N/mm^2 ； τ 表示岩石无限抗剪强度， N/mm^2 ； D_1 表示盘形滚刀直径，mm； ε 表示盘形滚刀刀角，rad；h表示滚刀贯入深度，mm。

由此可以计算银珠山刀间距计算尺寸 $S = 80 \text{ mm}$ 。

刀盘所需配置的滚刀数量可依式（4）进行初步计算：

$$N = \frac{D}{2S} \quad (4)$$

式中：N表示刀盘配置的滚刀总数；D为理论开挖直径；S表示刀间距。根据计算结果，本设计刀盘共布置滚刀22把。

滚刀布置方案是刀盘设计中的关键内容之一，其合理性直接关系到TBM掘进过程中的受力状态及运行稳定性。若刀具分布不合理，容易导致刀盘载荷分布不均，进而影响整机运行性能。因此，在进行盘形滚刀布置设计时，应重点满足以下要求：

（1）各滚刀在刀盘上的空间分布应尽量均匀，使刀盘在破岩过程中受力保持平衡，并尽可能减小径向载荷对刀盘结构的不利影响；

（2）掘进过程中，各滚刀作用力对刀盘产生的倾覆力矩应相互抵消，使其代数和接近于零，从而保证刀盘运转平稳，避免产生明显偏载现象。

此外，边缘滚刀的工作性能与其运动速度密切相关。当刀盘外缘滚刀线速度持续增大时，在相同推进力条件下，滚刀轴承所承受的冲击和摩擦作用将进一步增强，从而加速轴承磨损，缩短其服役寿命。

通过对国内外多种TBM设备参数进行统计分析，并结合刀盘直径与转速之间的变化规律，可建立二者之间的经验关系模型：

$$n = 22.226 D^{0.7453} \quad (5)$$

式中：n表示刀盘转速；D表示刀盘直径，mm；

该经验公式是在收集分析罗宾斯、维尔特以及德马克等国际主流TBM制造企业产品参数的基础上，结合国内相关设备运行数据，通过回归分析获得的。模型建立过程中假设刀盘外缘线速度不超过150 m/min，并预留了一定的安全裕度，因此具有较好的工程适用性。

结合银珠山矿区地层特征及掘进需求，本工程选用焊接式平面刀盘结构。刀盘通过法兰与主轴承系统连接，在刀盘表面配置17英寸（432 mm）中心双刃滚刀、正面单刃滚刀以及边缘滚刀等多种刀

具形式。所有滚刀均采用背装式安装结构，便于井下维护与更换。

滚刀安装采用楔块锁紧方式，能够将掘进过程中产生的载荷均匀传递至刀座及刀盘主体结构，从而提高整体受力可靠性。刀毅及刀圈材料均选用高强度耐磨工具钢制造，不仅能够增强刀具耐磨性能，同时有利于提升其破岩效率。中心双刀滚刀和正面滚刀均采用重载型轴承设计，其单刀最大承载能力可达到350 kN，能够满足硬岩条件下的掘进需求。TBM刀盘及滚刀结构形式如图2所示。

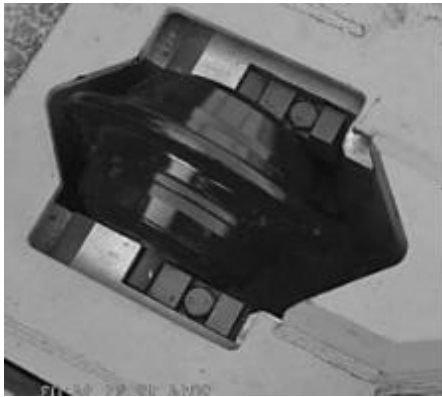


图1 TBM刀盘及滚刀

4. 掘进速度计算

TBM在不同饱和抗压强度围岩下的掘进速度如表2所示。

表2 银珠山工程 TBM掘进能力表

围岩类别	岩性	长度 / m	掘进速度 / (mm/min)
I	片理化凝灰岩、凝灰质砂岩、岩屑玻屑凝灰岩等	8892	42.5~50.0
II	片理化凝灰岩、凝灰质砂岩、岩屑玻屑凝灰岩等	10260	45.0~62.5
III	片理化凝灰岩、凝灰质砂岩、岩屑玻屑凝灰岩等	3420	27.5~44.0
IV	片理化凝灰岩、凝灰质砂岩、岩屑玻屑凝灰岩等	228	15.0~25.0

该工程围岩强度主要处于50 - 100 MPa之间，取平均值掘进速度不小于75 mm/min。TBM月掘进进尺采用公式计算：

$$V = 24V_{\max}d\mu \quad (6)$$

式中：V为月进尺速度，m/月； $V_{\max}$ 为每小时最大掘进速度，m/h；d为每月工作天数，取25天；为设备利用率，一般取0.28 - 0.41，计算取值0.35。经计算，I类围岩月掘进速度为630 m/月，II类围岩月掘进速度为787.5 m/月，III类围岩月掘进速度为554.4 m/月，IV类围岩月掘进速度为315 m/月，平均月掘进速度为659.9 m/月，大于设计工期需求的掘进速度500 m/月，满足TBM设计需求。

三、TBM的定制与优化改造

(一) 推进系统防护改造

遇地质不良段，为防止在掘进过程中渣石对主机阀件、电气、测量设备设施造成损伤，对主推油缸进行防护改造。在支撑盾上增加一排护指盾，在转弯时可方便拆卸和安装。保护罩分

布在顶部100°范围内。主推油缸回缩状态下，重合尺寸为1100 mm，主推油缸伸出状态下，重合尺寸100 mm，内外保护罩间隙为15 mm，综合考虑主推油缸耳座、污风管等结构的影响，在设备小转弯时，需要对分布在左右两侧的两个防护罩进行拆除，并在设备通过小转弯之后装回。

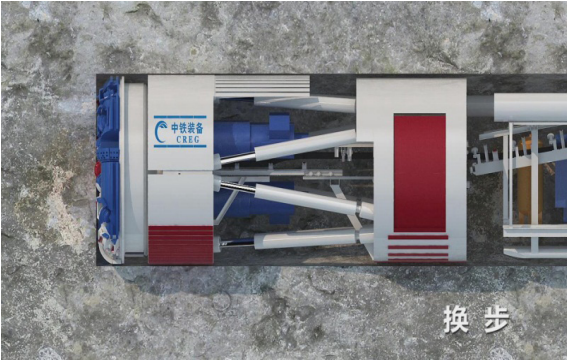


图2 主油缸部位图片

(二) 刀盘与出渣系统优化

软岩段刀盘贯入度增大，每圈破岩量增加，如果进渣不及时，将导致刀盘底部垫高，巷道底板标高出现起伏。经改造，调整了铲板角度，增大刀盘收渣口。



图3 调整进渣口角度

软岩段喷水过多时容易糊刀盘，若不喷水则工作面粉尘大。为解决这一问题，在刀盘渣石仓内增加另一条水管装喷头降尘。

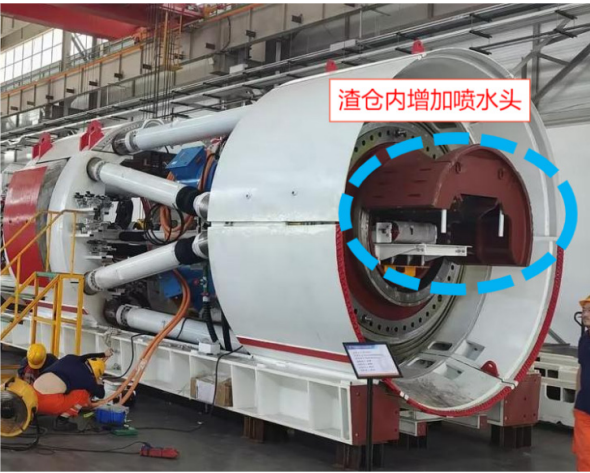


图4 增加降尘喷头

当边刀磨损而更换不及时，边刀旁耐磨衬板磨损快，且维修难。因此在边刀部位加装传感器，能自动检测及时换刀。

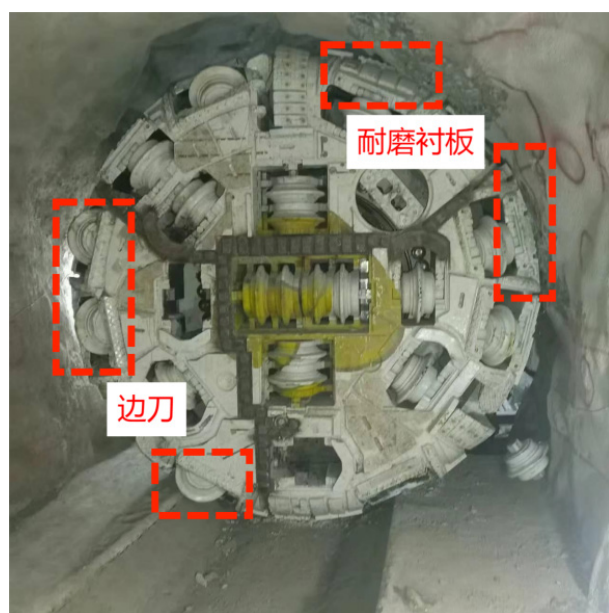


图5 增加耐磨板

(三) 护盾及安全支护改造

本TBM支撑盾受力面布置在拱上部120°范围，不良地质段围岩受支撑盾挤压后，特别容易出现冒顶。因此把支撑盾受力面改为布置中部或底部范围内，将支撑力向底板，降低撑靴压力对围岩的破坏，保护巷道拱部围岩^[3]。

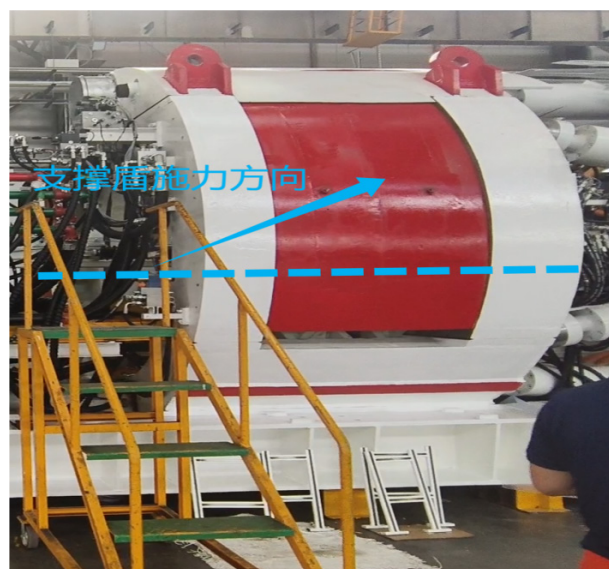


图6 更改支撑盾位置

由于通过Ⅳ类围岩时需及时进行锚杆支护，于是改造现有锚杆钻机，改造内容为：（1）在现有锚杆钻机基础上增加伸缩臂，伸缩机构包含滑动套，伸缩油缸等，实现锚杆钻机前后移动约2.4 m；（2）锚杆钻机管线需延长1.4 m；（3）拆除主机皮带机后部吊挂装置，锚杆钻机可实现左右约140°摆动功能；（4）锚杆钻

机仍使用原钻机，通过接杆实现钻深比小于1.8 m。改造后的锚杆钻机能实现机械化自动接杆或换杆、自动锚网，人员在安全区域遥控操作，满足长度在2 m以上锚杆施工，钻机至少能覆盖拱顶150°区间，在1#拖车上安装钻机前后移动的3 m滑道。

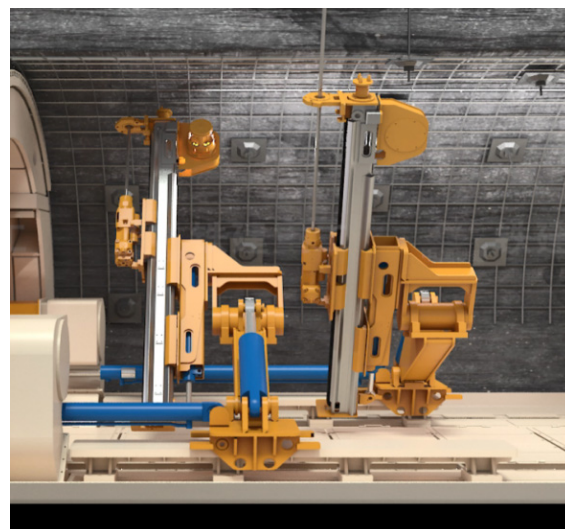


图7 安装钻机滑道

(四) 后配套及辅助系统优化

因压变器、配电柜尺寸制约，后配套拖车与巷道间隙只有100 mm，安装钢拱架后，制约后配套拖车通行。经改造，后配套拖车中压变器、配电柜尺寸进行定制，增加后配套拖车与巷道间隙到200 mm左右。

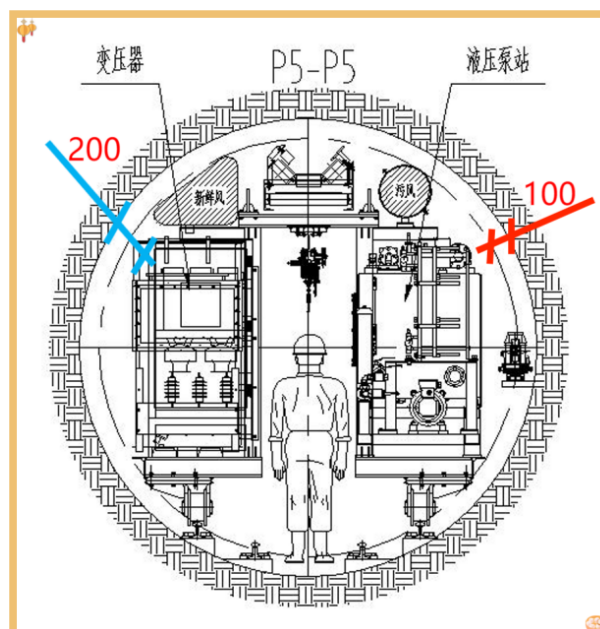


图8 增加后配套拖车与巷道间隙

由于循环水池散热达不到要求，设备长时间工作会造成过热停车。改造后，增加散热片及循环水池或循环水箱设在通风良好的地方，以便热交换。

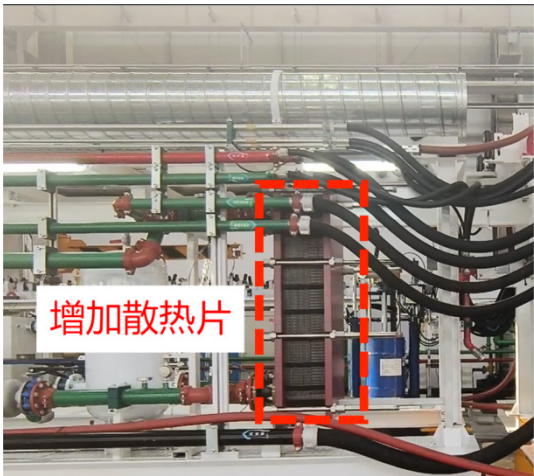


图9 增加散热片

四、结束语

在地下金属矿山应用 TBM 开拓是一项系统工程。本研究通过科学选型，并针对性实施“V”型油缸小转弯推进、面板式刀盘优化、增设护盾及辅助支护设备等多项定制改造，成功克服了 30 m 超小转弯、易塌方及排渣通风难等施工瓶颈。优化后的敞开式 TBM 有效提升了设备的工况适应性、运行安全性与掘进效率，为未来同类金属矿山的机械化开拓提供了成熟的设备定制经验与工法参考。

参考文献

- [1] 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 (05): 33-36.
- [2] 郭红斌, 万磊, 徐礼亨, 等. 长距离大埋深急曲线矿山巷道 TBM 适应性选型研究 [J]. 建筑机械化, 2025, 46 (08): 57-61.
- [3] 吴根生, 孙义, 白玉杰. 敞开式 TBM 支护质量统计分析及优化措施研究 [J]. 四川建筑, 2025, 45 (04): 92-95.