doi: 10. 20238/j. issn. 1671-4172. 2026. 06. 017
柴慧珍, 李冬萍, 初士俊, 等. 复杂地层下金属矿山TBM适应性改造研究[J]. 有色金属(矿山部分), 2026, 78(6): 174-183.
Chai Huizhen, Li Dongping, Chu Shijun, et al. Research on adaptability modification of TBM for metal mines in complex strata[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2026, 78(6): 174-183.

复杂地层下金属矿山TBM适应性改造研究

柴慧珍[1,2], 李冬萍[3], 初士俊[1,4], 熊国涛[1], 牛　雄[5], 杨慧云[1], 乐容昌[1]
(1. 中国十五冶金建设集团有限公司, 武汉 430075;
2. 中南大学 资源与安全工程学院, 长沙 410083;
3. 中国有色矿业集团有限公司, 北京 100029;
4. 中南大学 资源加工与生物工程学院, 长沙 410083;
5. 湖北中色矿山工程技术有限公司, 武汉 430075)

摘　要: 随着金属及非金属矿山等大型资源工程建设持续推进, 传统钻爆法难以满足绿色、高效的矿山开采需求。以全断面硬岩隧道掘进机(TBM)为代表的机械化掘进技术持续创新, 凭借高效率、高安全性及对环境影响小等优势, 可实现快速掘进。本文针对某地下金属矿山一期工程中超小转弯半径TBM的工程实践, 对原有设备进行了技术改进与功能提升。通过总结该改造工程中的有效经验, 并将其应用于后续工程的TBM设计, 开展专项优化与功能优化, 提升后续TBM设备的地质适应性与工程适用性。本文提出的TBM设备改造要点对TBM选型及改造工程具有一定的参考价值。

关键词: 全断面硬岩隧道掘进机(TBM); 超小转弯半径; 设备改造; 功能优化; 适用性
中图分类号: TD421　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1671-4172(2026)06-0174-10

Research on adaptability modification of TBM for metal mines in complex strata

Chai Huizhen[1,2], Li Dongping[3], Chu Shijun[1,4], Xiong Guotao[1], Niu Xiong[5], Yang Huiyun[1], Yue Rongchang[1]
(1. China 15th Metallurgical Construction Group Co., Ltd., Wuhan 430075, China;
2. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;
3. China Nonferrous Metal Mining (Group) Co., Ltd., Beijing 100029, China;
4. School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, China;
5. Hubei CNMC Mine Engineering Technology Co., Ltd., Wuhan 430075, China)

Abstract: With the continuous advancement of large-scale resource engineering projects such as metal and non-metal mining, traditional drilling and blasting methods are difficult to meet the needs of green and efficient mining. Mechanical excavation technology, represented by Full-Face Hard Rock Tunnel Boring Machine (TBM), is continuously innovating. With advantages such as high efficiency, enhanced safety, and minimal environmental impact, TBM enable rapid tunneling. This study addresses the practical application of the ultra-small turning radius TBM in the first phase of a certain underground metal mine project. Technical improvements and functional enhancements were made to the original equipment. Through summarizing the effective practices from this retrofit project and applying them to the TBM design for subsequent projects, targeted and functional optimizations have been achieved to enhance the geological adaptability and engineering applicability of future TBM equipment. The key points for TBM equipment retrofitting proposed in this paper provide valuable reference for TBM selection and retrofitting projects.

Key words: tunnel boring machine (TBM); ultra-small turning radius; equipment modification; functional improvements; applicability

收稿日期: 2026-04-27
基金项目: 中国有色矿业集团有限公司科技项目(2023KJZX033)
作者简介: 柴慧珍, 博士, 工程师, 主要从事金属矿山安全高效开采技术、采选联合技术的研究与应用。
通信作者: 初士俊, 博士, 高级工程师, 主要从事金属矿山非爆机械采掘技术、采选联合技术的研究与应用。

近年来，以金属矿山、非金属矿山开发为代表的大型资源工程建设得到迅猛发展[1]。为满足日益增长的矿山资源需求及社会的高速发展，大型矿山及深部资源的开采迫在眉睫[2-3]。传统钻爆法效率低、基建周期长、安全性较差，难以满足矿山建设发展和开采需求，“采掘失衡”矛盾凸显[4-5]。

TBM 施工是集掘进、支护、出渣等施工工序于一体的并行连续作业，广泛应用于地铁、铁路与水利等领域，但是目前在金属矿山领域应用较少[6-8]。由于金属矿山独特的地质环境与巷道工程需求，矿用 TBM 与其他工程用 TBM 相比，在工程地质条件、巷道线路设计、设备技术要求等方面差异显著[9-10]。深部金属矿山 TBM 巷道开拓的安全与效率，受控于涌水、岩爆、高地温等复杂灾害环境的耦合作用，并受断层破碎带导致的岩体完整性劣化所制约[11]；金属矿山 TBM 巷道掘进断面小、转弯半径小、坡度大，需对空间尺寸、巷道线路规划等进行针对性的工程设计[12]；依据矿山地质条件进行设备选型、功能设计和关键部件制造，以适配金属矿山特殊工况[13]。然而，现阶段金属矿山 TBM 工程案例相对匮乏，选型设备存在局限性，在应对复杂及突发工况时的响应能力有限，需对设备进行强化与改造，以提升其性能，保障施工效率和安全，有效缩短现场作业工期[14-15]。

本文以某地下金属矿山巷道开拓工程为例，分析总结了 TBM 施工遇到的问题，然后结合生产安排和现场实际情况将该矿用 TBM 改造方案分为现场改造和返厂改造两部分，并展示了部分现场改造成效。在此基础上将前期改造经验应用于后续矿用 TBM 的针对性设计优化，以便进一步提升 TBM 设备与项目工况的适配性。

1　工程概况

某地下金属矿山设计采选能力为 100 万 t/a，巷道主体采用 TBM 掘进施工，围岩以Ⅲ、Ⅳ类凝灰岩为主，岩体完整性较差，构造破碎带密集发育。一期工程掘进施工区域为 −190 中段至 −140 中段的措施斜坡道，掘进距离 3 047 m，断面净尺寸 3.5 m；二期工程掘进施工区域为 −140 中段平巷，掘进距离 3 841 m，断面净尺寸 3.5 m，掘进路线如图 1 所示。

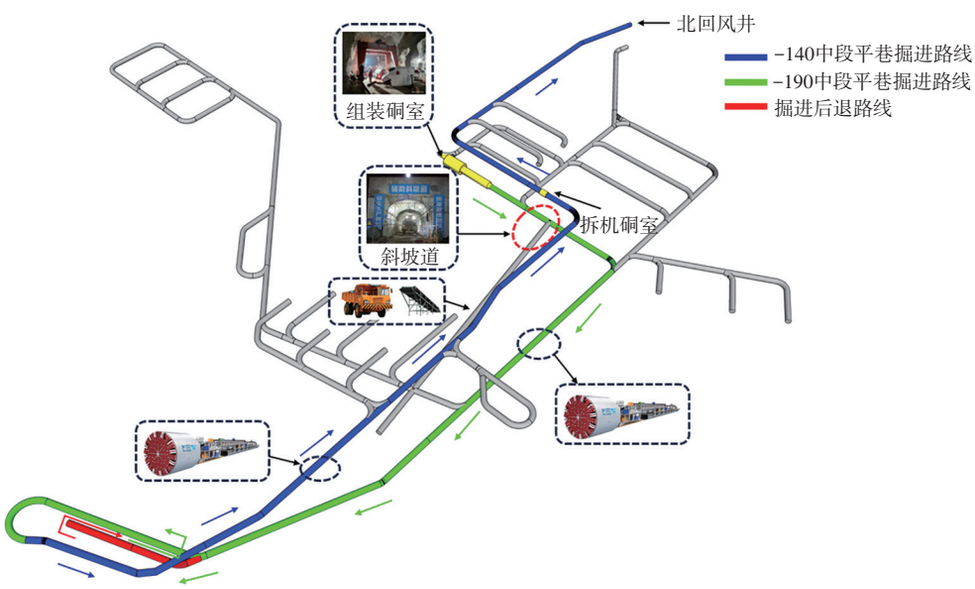


图 1　掘进线路图

Fig. 1　Tunnel boring route diagram

该项目采用的 TBM 整机长度 62 m，包括刀盘、盾体、驱动、推进、锚拱支护、后配套、皮带运输等单元；断面直径 3.53 m，最小转弯半径 30 m，可适应上下坡 ±15%；采用“V”型油缸推进系统，可满足巷道开拓过程中的小半径转弯要求。

2　TBM 施工问题总结

一期工程现场施工实践表明，本矿用 TBM 使用效果良好，该设备集破岩、出渣、支护、除尘功能于一体，实现了多工序平行作业，单日最高进尺 28.06 m，施工效率明显高于钻爆法施工工艺；但受巷道围岩

复杂地层条件制约,现场掘进施工仍暴露出诸多问题,具体分析总结如下。

2.1 掘进系统

1)掘进系统防护不当,落渣积渣严重,盾体内空间狭小,清理困难;

2)主驱动电机布置不合理,下坡掘进存在淹机风险。

2.2 支护系统

1)现场临时支护承载力不足,支护配套措施不完善,未布设钢筋排、拱架等支护设施,针对破碎围岩地段的施工支护能力存在短板;

2)锚杆钻机尺寸过大,使用不便且布置偏后,钻机钻孔深度与2 m锚杆长度无法匹配;

3)Ⅲ、Ⅳ类围岩破碎带需采用人工撬毛作业,不仅劳动强度大,还易出现清撬不彻底的问题,作业人员安全难以得到有效保障,且后续施工中仍存在围岩碎块二次坠落的安全隐患。

2.3 出渣系统

小转弯时皮带机皮带易翻转、跑偏、撕裂,运渣过程中容易出现漏渣。

2.4 辅助系统

1)后配套拖车安全间距不达标,设备与洞壁间隙仅约100 mm,掘进转弯过程中易发生剐蹭洞壁的问题;

2)设备掘进作业时升温迅速,同时产生大量粉尘,作业人员难以持续开展施工;

3)拖车前端预留铺轨区域受上方皮带装置遮挡,底部作业空间狭小,单次仅可铺设3 m轨道,不仅作业难度大,也大幅增加了施工工作量。

3 现场改造方案

结合工程进度与问题风险等级等情况,优先选取整改难度小、亟需处置的问题开展现场改造。通过完善掘进系统防护、增设支护设施等举措,提升设备穿越不良地质段的安全性能与运行可靠性。

3.1 新增可拆卸防护装置

本项目使用敞开式TBM,掘进时主推进油缸区域落渣积渣严重,在前盾和支撑盾之间增加可拆卸指形护盾,如图2所示。护盾在直线掘进状态时进行安装,外指形护盾周向防护范围为120°,内指形护盾周向防护范围为80°,使其具备在破碎地层的顶部防护能力;设备在转弯状态时进行拆除,使之满足30 m的小转弯能力。

3.2 新增钢拱架拼装器

新增钢拱架拼装系统,使其具备全圆拼装功能和前后1 m的移动行程,如图3所示。现场施工时,受拖车主结构空间限制,该系统无法实现钢拱架的全圆安装,因此,采用厚度小于100 mm的钢架,预先完成顶部220°范围的拼装,随后通过锁脚锚杆对钢拱架进行固定。

3.3 优化锚杆钻机

为提升支护作业效率,对锚杆钻机配置及其空间位置进行了针对性改造,重点在于增大单次钻进深度并缩短空顶距离,如图4所示。改造后,锚杆钻机布设于距支撑盾尾部约1.3 m处,显著缩短了支护空窗期,使围岩支护更为及时。同时,钻机增设推杆功能,其摆动作业范围扩展至约140°,进一步增强了施工适应性。

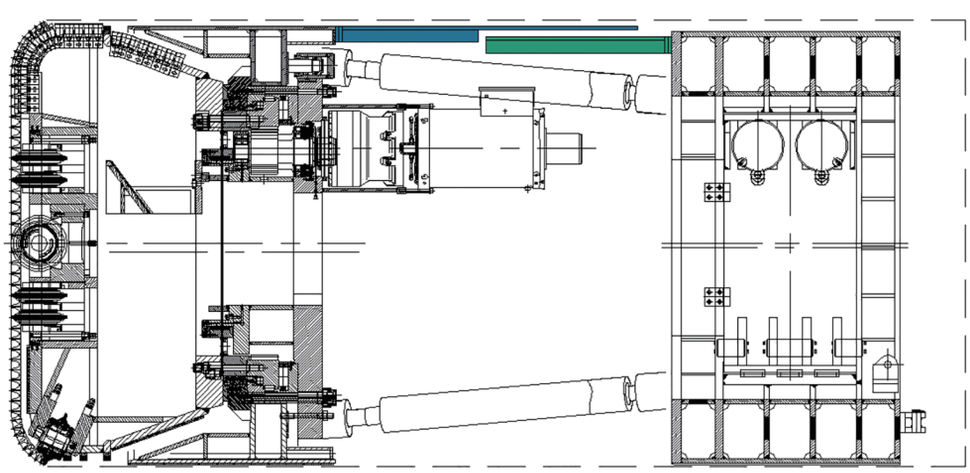


图2 可拆卸指形伸缩盾结构

Fig. 2 Detachable finger-shaped telescopic protective cover structure

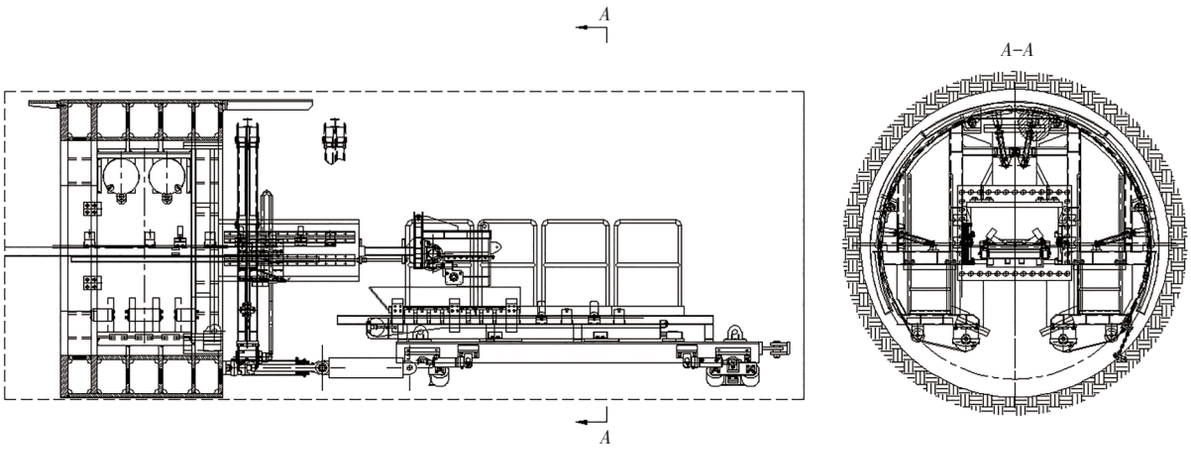


图3　钢拱架拼装机位置及结构

Fig. 3　Location and structure of the steel arch truss assembly machine

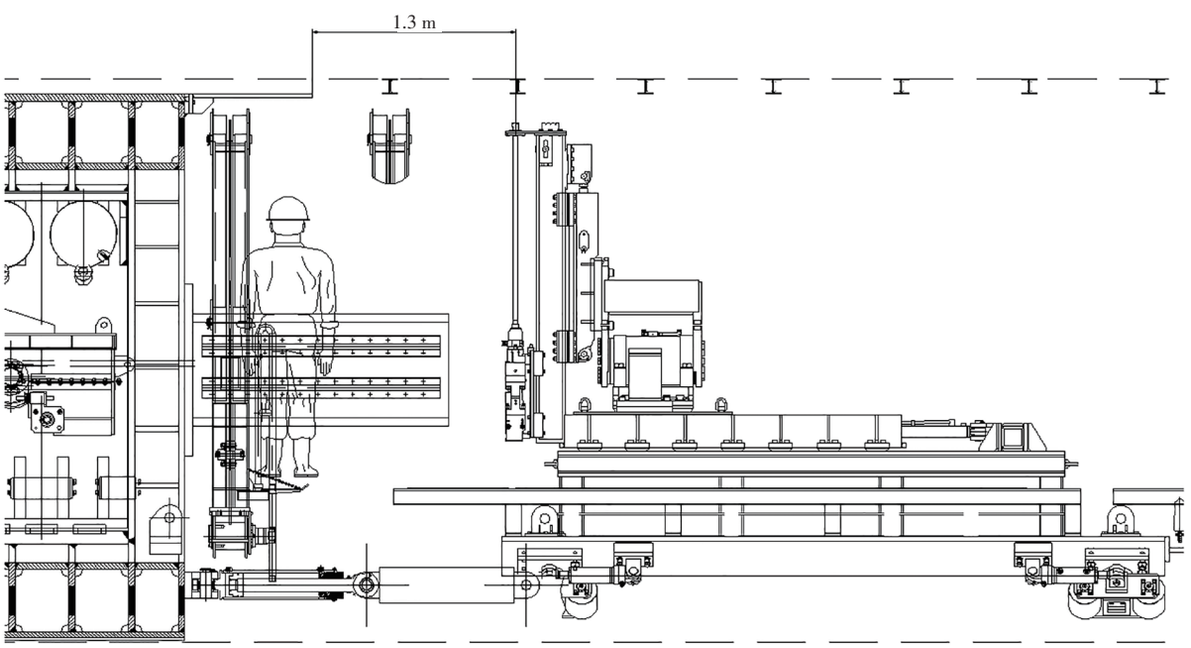


图4　锚杆钻机位置

Fig. 4　Location of the anchor drilling rig

3.4　优化后配套空间

增加钢拱架后，后配套设计安全线需单边向内缩径100 mm，设备布置控制安全线调整为3 030 mm，需将局部元器件向内挪动约80 mm，设备桥、3～8号台车顶部平台整体向下挪动约800 mm，如图5所示。

3.5　优化皮带机

增加钢拱架拼装器后影响皮带机转弯，需将皮带机进行改造。将2#皮带机落料点前移至支撑盾内部，1#皮带机尾部相应缩短；同时，后配套皮带机随2#皮带机延伸而整体延长，如图6所示。

对皮带机的衔接处漏渣点进行软密封，并增加皮带导向辊，从而增强皮带机的适应性。小转弯时2#皮带机皮带易翻转、跑偏、撕裂，故而对皮带机架进行改造，增加角度调节的范围。

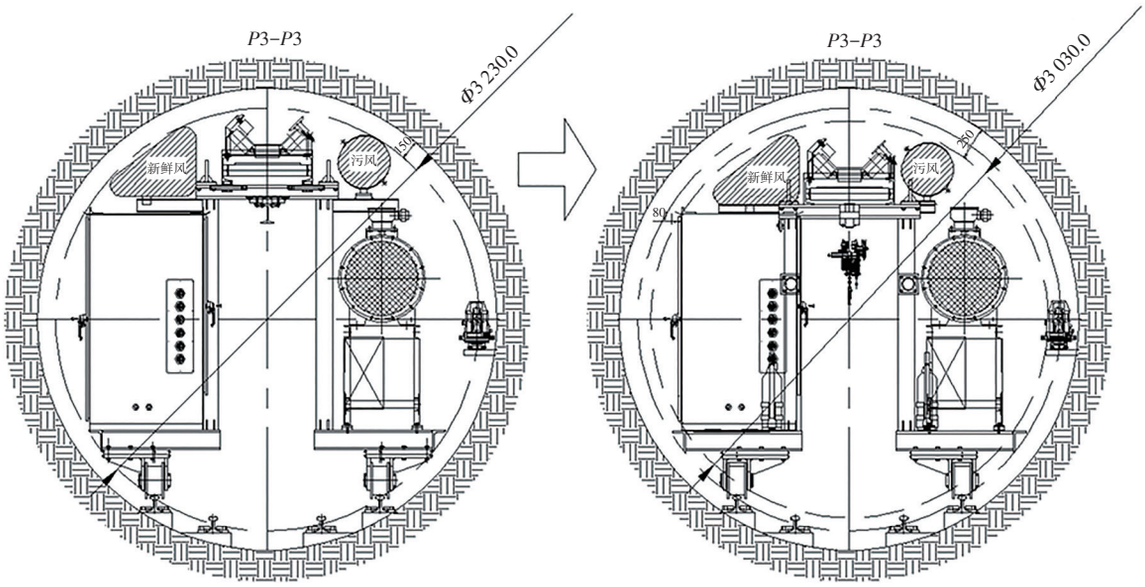
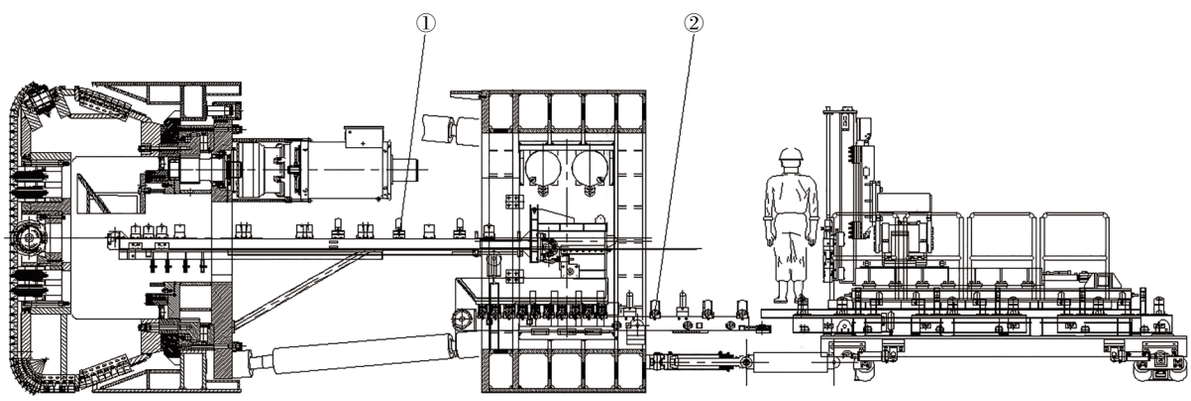


图5　后配套台车缩径

Fig. 5　Reducing diameter of rear support carriage



①—1#皮带机；②—2#皮带机。

图6　皮带机改造

Fig. 6　Belt conveyor modification

4　现场改造应用效果

4.1　减少主推进油缸区域积渣

为解决渣土在主推进油缸区域堆积，降低人工清渣作业难度，通过螺栓连接安装了可拆卸指形护盾。安装后明显降低了主推进油缸区域积渣清理频率及密封件的故障率，如图7所示。

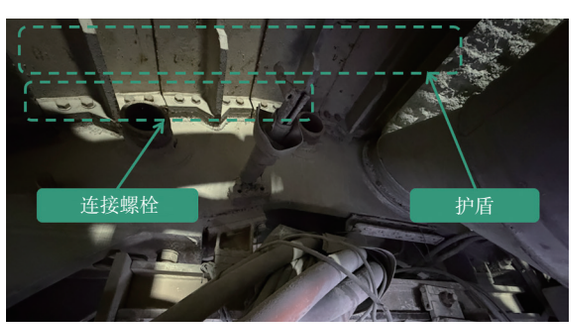


图7　新增可拆卸伸缩盾

Fig. 7　Added detachable telescopic shield

4.2　提高支护能力

原设备缺乏钢拱架拼装器等主动支护手段，单一支护方式在面对复杂破碎带时具有局限性，新增钢拱架拼装器、优化锚杆钻机，构建“锚杆＋钢拱架”联合支护结构。具体表现为，新增钢拱架拼装器，可在掘进过程中快速完成钢拱架的安装，为盾体通过后的应急临时支护提供了机械化保障，提升破碎地层段的通过能力；优化后的锚杆钻机覆盖范围增加，增强单台锚杆钻机的实际连续作业能力，如图8所示。



图8　支护系统优化

Fig. 8　Optimization of support system

4.3　增强设备通过性

在曲线段和小半径转弯区域，TBM设备的后配套台车与巷道壁之间的安全间隙不足问题尤为突出。通过设备桥平台和3～8号台车顶部平台整体下移、污风管和除尘风管重新定位、干涉部分重新定位调整等工作优化后配套台车与巷道间隙，提高设备在曲线段和复杂地层的通过性。

4.4　提高出渣能力

通过将3～8号台车顶部皮带机下移150 mm，并延长后配套皮带机，有效消除了新增钢拱架拼装器对皮带机转弯半径及运行轨迹的空间干涉问题，降低了皮带机撒料风险，确保了皮带机在复杂工况下的顺畅运转与转弯安全。

5　返厂改造方案

虽然解决了主推进油缸区域积渣、支护能力不足等突出问题，但受地下作业空间狭小、施工工期紧张及大型配件运输困难等多重因素制约，现场改造仍然具有局限性，没有完全满足设备适应性提升要求。改造后仍然存在以下问题：1）指形护盾密封等级低，渣土侵入现象未完全遏制，影响设备运行环境；2）支护单元自动化水平低，面对围岩挤压大变形时设备姿态调节能力不足，导致工序衔接不畅；同时，人工撬毛作业安全风险突出，缺乏有效的远程操控与防护隔离手段；3）后配套拖车与巷道管排、支架及锚网支护系统之间存在空间干涉。针对上述问题，需对该矿用TBM进行返厂改造，旨在通过系统性结构优化与功能升级，全面提升设备适应性及作业安全性。

5.1　主推进油缸区域防护改造

1）在前盾与支撑盾之间增加双边铰接功能的全覆盖伸缩盾，在实现该区域全方位防护的同时，适应设备小转弯需求。

2）在撑紧盾后方设置液压临时支护系统，解决支护区域围岩掉块问题，保障现场施工安全；该系统采用分区独立控制，在实施锚网作业时，可单独解除作业区支撑力以实现施工让位，同时确保非作业区持续提供有效支护，在保障施工安全的前提下，提升交叉作业的连续性。

3）对拖拉油缸连接梁、油缸耳座实施改造。针对油缸耳座变形问题，重新制作连接梁，并在拖拉油缸耳座尾部（掘进方向后方）增设焊筋板，提升结构强度。

5.2　优化支护单元

1）配置锚杆钻机，满足锚杆长度2 m的锚网支护要求；实现机械化自动接杆、换杆及自动锚网，作业人员在安全区域遥控操作；滑移距离达到2.5～3 m。

2）调整支撑盾安装位置，将其受力面布置于设备中部或底部，使支撑力作用于巷道底板，有效保护拱部围岩。

3）新增喷混系统。增设两节配套拖车与一台皮带输送机，为喷混系统预留专用安装空间。皮带机布置于设备下部，拖车侧边区域用于堆放喷混施工物料；改造后可实现渣料由本机皮带平稳转运至长距离连续皮带机，保障出渣作业连续通畅。

4）新增撬毛破碎机械臂。该设备可在巷道顶部120°作业范围内完成浮石清撬作业，清撬产生的大块经机械臂破碎至合格块度后，掉落至下方溜渣板，再转运至皮带输送机。设备采用遥控操作，操作人员在安全区域作业，安全保障能力强。

5.3　后配套拖车改造

设备转弯掘进时，管排及固定管夹具易与巷道右侧帮壁发生剐蹭、干涉，进而造成管排、支架变形及管夹具破损。此外，破碎带区域完成锚网支护后，支护结构也易与设备后配套系统产生干涉。为解决干涉问题，需对后配套拖车进行改造，将其整体宽度缩

减,左右两侧各收窄 100 mm。

6 后续矿用TBM设计优化

另一地下金属矿山设计采选能力为300万t/a,巷道主体采用TBM掘进施工,巷道全长9.714 km,断面净尺寸5.63 m,最大坡度为12%,穿越地层以Ⅱ、Ⅲ类围岩为主。基于前期工程施工和设备改造经验,结合新项目的实际情况,新设备在盾体封闭式设计、支护系统、出渣系统、辅助系统、大坡度掘进等方面积极开展针对性设计和功能优化,从而提升TBM设备的地质适应性和施工可靠性。

6.1 掘进系统封闭式设计

伸缩盾与前盾尾壳采用封闭式全圆壳体设计,有效防止盾体积渣,同时盾体之间预留足够的间隙,满足现场转弯掘进的要求,如图9所示。



图9 封闭式全圆壳体

Fig. 9 Closed full-circle shell

6.2 支护系统功能设计

针对断裂破碎带地层,TBM配置钢筋排支护系统、钢拱架拼装机、锚杆钻机及辅助撑紧系统,从而提高TBM在破碎地层段的支护能力,保证TBM快速高效地通过不良地质段。

主要施工工序:在撑紧盾内侧插入钢筋,随着TBM掘进,钢筋排逐步外露;借助钢拱架安装器完成钢拱架拼装,并利用拱架撑紧洞顶钢筋排,再采用锚杆钻机施作锚杆,实现洞顶钢拱架的临时固定。

1)钢筋排支护系统(图10)。撑紧盾设置钢筋排支护系统,拱顶覆盖范围110°,可存储长度3 m的钢筋排。配合应急喷混、拱架系统,可快速通过短距离断层破碎带。

2)锚杆钻机系统(图11)。位于撑紧盾后方,可分为摆动机构、锚杆钻机执行机构和行走机构三部分。选用在坚硬岩层钻孔效率较高的液压冲击式锚杆钻机,钻杆直径Φ=38~51 mm。锚杆钻机可随TBM



图10 钢筋排支护

Fig. 10 Reinforcement bar support system

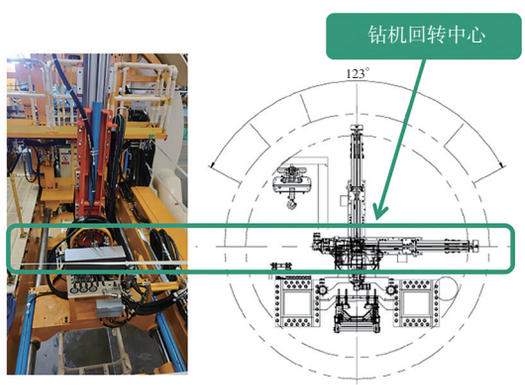


图11 法向锚杆钻机支护

Fig. 11 Normal anchor drilling rig Support

主机进行锚杆支护工作,掘进时平行作业。

3)钢拱架拼装机构(图12)。由可伸缩的撑紧臂组成,可实现径向伸缩,配合人工作业即可实现钢拱架拼装。支护型钢主要包括工字钢、H型钢等。拼装钢拱架时人员将拱架分块放置于拱架撑紧臂上,然后通过撑紧臂将其撑紧至洞壁,拱架仅覆盖3/4全圆范围,底部采用手持钻机施作锁脚锚杆进行固定,设备通过后,再补拼底部拱架,合拢形成整圆。

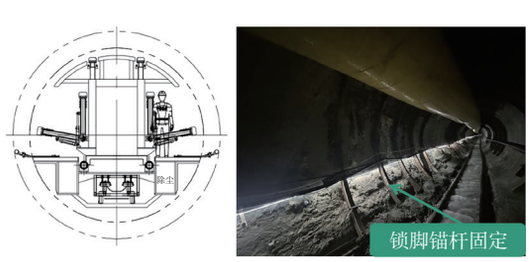


图12 拱架拼装机构图

Fig. 12 Arch frame assembly mechanism diagram

4)配置辅助撑紧系统(图13)。增大前盾区域稳定器撑紧力及撑紧面积,增强换步能力;配置辅助撑靴,在破碎软弱围岩条件下借助两侧巷帮实现换步,防止大坡度掘进时设备下溜。

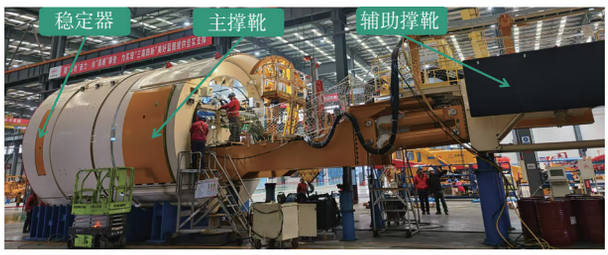


图13　辅助撑紧系统

Fig. 13　Auxiliary gripper system

6.3　小转弯可调皮带机设计

主推油缸斜直布置，水平＋斜拉油缸结合布置，便于人员操作调向。皮带机处设置调向油缸，实现小转弯调节；采取深槽角运输、爬坡段全程护罩、小转弯强制纠偏等措施，如图14所示。

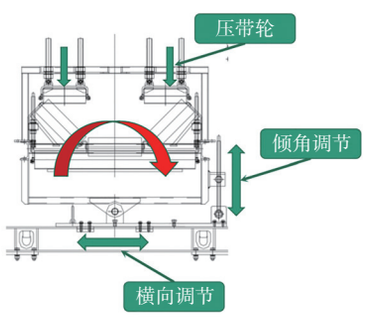


图14　小转弯可调皮带机

Fig. 14　Small-turn adjustable belt conveyor

6.4　后配套安全距离设计

预留支护后设备通过空间，提高安全性。后配套与洞壁之间安全距离为450 mm，两侧设计可翻折平台用于人员通行，锚杆支护后设备可正常通行，更大的安全距离有助于TBM转弯掘进，如图15所示。

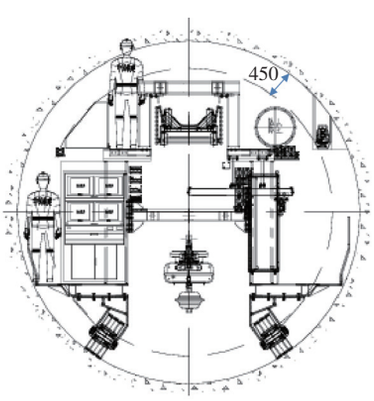


图15　后配套设备空间布置

Fig. 15　Rear auxiliary equipment layout

6.5　通风系统优化设计

因该矿山井下高温问题尤为突出，所以TBM从选用制冷设备、高功率二次风机方面均开展了针对性设计。二次通风系统配置2×45 kW进口二次风机，配置1台空气冷却设备，通过水冷方式冷却空气，降低TBM区域环境温度，制冷功率为315 kW，可无极调整风机功率。空冷系统采用模块化设计，安装现场只需连接设备主电缆及冷却/冷冻水管，空气冷却器置于台车二层，与风管串联。

TBM设备产热由水冷系统带出。在巷道一次通风系统供风量不小于975 m^3/min，TBM施工供水系统进水水温不超过25 ℃的情况下，TBM配置的制冷系统制冷功率为315 kW，新鲜风经过空冷器后可降低风温8～10 ℃；在进口风温度39.03 ℃时，可将盾体作业区域温度控制在30 ℃以下。

6.6　铺轨工序优化设计

第一台矿用TBM施工时后配套行走在钢轨上，每掘进3米之后设备需停机等待人员进行钢轨运输铺设作业，这不仅影响施工效率，而且还加大了工人劳动强度，耗时耗力，通过减少工序增加现场掘进时间并降低劳动强度。

新设备借鉴煤矿TBM的大钢轮行走技术，后配套行走设计为大钢轮无轨行走方式，后配套行走轮直接行走在洞壁两侧，省去钢轨物料运输铺设流程，从而加快TBM施工效率，同时中间区域供物料运输车通行，如图16所示。配套连续皮带机出渣，保证出渣连续性。针对大钢轮转弯调向时易出现跑偏问题，在后配套一号拖车及尾部拖车前轮设计有液压调向机构，可直观调节大钢轮的偏移量，实现拖车左右调向。



图16　拖车大钢轮

Fig. 16　Trailer with large steel wheels

6.7　大坡度掘进设计

配备CFC电法超前探水系统，利用含水岩体电导率和电容率增大的特性，通过测量围岩复电导率分布，探测掌子面前方100 m范围内的富水异常区。为防止主驱动电机淹机，主驱动配置4台400 kW电机，

均为上方布置，电机下方最低点距洞底高度约为2.5 m，有效防止电机被水浸泡。

正常排水量10 m^3/h以内时，盾体区域布设1台排水泵，将积水经TBM机载排水管输送至台车污水箱，水体沉淀后，再由排沙泵经由TBM水管卷筒、巷道排水管路排出巷道；巷道发生大涌水时，依据涌水规模增设大排量排沙泵，接入巷道排水管路后立即启动，完成涌水排放。

6.8　新增人性化设计

增加淋浴间、休息室、卫生间等人性化设备，改善井下作业环境，如图17所示。



图17　新增人性化设备

Fig. 17　New user-friendly equipment

6.9　TBM可拆卸设计

设备大件采用小分块设计，刀盘采用4＋2分块设计，如图18所示。中间块最大质量13.5 t，预留焊接坡口，井下组装后实施现场焊接。主驱动变速箱采用减重设计，配套3 m主轴承，质量约13 t，为整体式结构；加工专用工装，采用倾斜姿态下井运输。

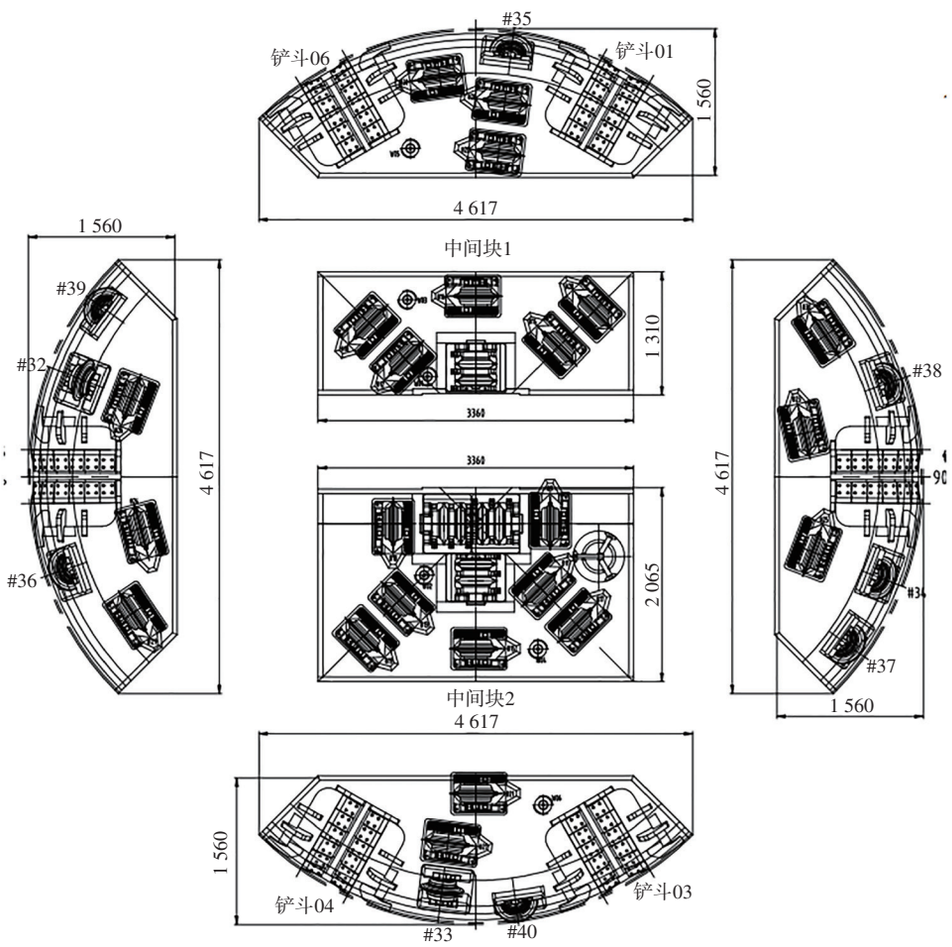


图18　刀盘分块设计

Fig. 18　Segmented cutterhead design

7　总结及展望

本文基于矿用TBM在掘进、支护、出渣及辅助等核心系统中暴露的问题，对已用TBM实施了现场改造，并完成了返厂改造方案设计。在此基础上，将前期工程施工和设备改造经验用于后续矿用TBM的优化设计中，使新设备在掘进系统、支护系统、出渣系统、辅助系统等方面均进行了功能优化，从而提高了TBM设备在金属矿山领域的适用性，推动了矿用

TBM技术装备的持续迭代。今后，金属矿山TBM设备设计应结合井下矿山开采设计，从采掘工程设计、设备模块化设计等方面，进一步提高TBM的适用性以及经济性。

1）设备与采掘生产贴合度高、适配性强。TBM设备与采矿设计深度融合，衍生出新的生产工艺体系，丰富采矿作业手段。

2）设备模块化、适配性显著提升。TBM设备朝着模块化、智能化方向迭代升级，有效增强了设备工况适应性与巷道通过性能，提升设备开机利用率，为巷道日进尺效能提升筑牢硬件基础。

3）技术经济性显著提升。提高设备日进尺及整体采掘速度，保障施工全过程永临结合实施效果，降低延米成本，提升工程经济效益。

参　考　文　献

[1] 周爱民，王长军，龚锦睿．金属矿床绿色开采技术与装备研究进展及未来发展趋势[J]．黄金，2025，46(10)：1-10.
Zhou Aimin，Wang Changjun，Gong Jinrui. Research progress and future development trends of green mining technology and equipment for metal deposits[J]. Gold，2025，46(10)：1-10.

[2] 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.

[3] 杨小聪，蒋合国．深部金属矿山卸荷开采与预处理技术综述[J]．中国矿业，2025，34(4)：64-75.
Yang Xiaocong，Jiang Heguo. Review of destressing mining and preconditioning techniques in deep metal mines[J]. China Mining Magazine，2025，34(4)：64-75.

[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] 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.

[6] 刘冀尧，李彬．智能化和低碳化矿山机械在国内的应用及发展趋势[J]．矿山机械，2024，52(5)：49-54.
Liu Jiyao，Li Bin. Application of intelligent and low-carbon mining machinery in China and its development trend[J]. Mining & Processing Equipment，2024，52(5)：49-54.

[7] 丁卜祯．城市复杂地质条件土压TBM双模掘进机技术研究[J]．铁道建筑技术，2025(11)：19-22.
Ding Buzhen. Research on dual-mode TBM technology under complex geological conditions in cities[J]. Railway Construction Technology，2025(11)：19-22.

[8] 熊聪聪，张朋宽，潘朋，等．大埋深山岭双护盾TBM隧道泄水式管片降压效果研究[J]．高速铁路技术，2025，16(5)：72-78.
Xiong Congcong，Zhang Pengkuan，Pan Peng，et al. On the pressure reduction effect of drainage segments in deep-buried mountain double-shield TBM tunnels[J]. High Speed Railway Technology，2025，16(5)：72-78.

[9] 张春虎，周少兵，刘荣乐，等．不良地质条件下金属矿山巷道TBM掘进围岩稳定性研究[J] 科技和产业，2025，25(12)：9-14.
Zhang Chunhu，Zhou Shaobing，Liu Rongle，et al. Research on the stability of surrounding rock in TBM tunneling of metal mine roadways under adverse geological conditions[J]. Science Technology and Industry，2025，25(12)：9-14.

[10] 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.
Xu Changlei，Liu Yuming，Deng Haoze，et al. Design innovation and reflection on promoting TBM application at the source of super large scale hard rock mines[J]. China Mine Engineering，2024，53(1)：65-71.

[11] 朱爱山，周慧鹏，李勇．TBM法用于金属矿山深部开拓巷道的风险分析及应对措施[J]．钻探工程，2021，48(7)：110-114.
Zhu Aishan，Zhou Huipeng，Li Yong. Risks and solutions of the TBM method used in deep roadway boring for metal mines[J]. Drilling Engineering，2021，48(7)：110-114.

[12] 杨明，张家乐，初月朗，等．深部煤矿大坡度斜巷TBM运输与组装关键技术[J]．煤炭技术，2025，44(11)：77-82.
Yang Ming，Zhang Jiale，Chu Yuelang，et al. Key technology of TBM transportation and assembly in large slope inclined roadway of deep coal mine[J]. Coal Technology，2025，44(11)：77-82.

[13] 何刚．近邻城市复杂地质条件下输水隧洞TBM适应性选型研究[J]．云南水力发电，2026，42(1)：91-93，97.
He Gang. Research on TBM adaptability selection for water conveyance tunnels under complex geological conditions in neighboring city[J]. Yunnan Water Power，2026，42(1)：91-93，97.

[14] 王晓奎．复杂破碎围岩下敞开式TBM适应性改造与防护关键技术研究[J]．装备维修技术，2026(2)：63-65，69.
Wang Xiaokui. Key technologies for adaptive transformation and protection of open-type TBM in complex and broken surrounding rock[J]. Equipment Technology，2026(2)：63-65，69.

[15] 王恩辉，吕昀龙，赵飞．穿越连续破碎地层开敞式TBM改造技术研究与应用[J]．水利规划与设计，2024(1)：124-130.
Wang Enhui，Lü Yunlong，Zhao Fei. Research and application of open-type TBM modification technology for crossing continuously fractured strata[J]. Water Resources Planning and Design，2024(1)：124-130.