doi: 10. 20238/j. issn. 1671-4172. 2026. 06. 016
牛雄,李深远,杨慧云,等. 赞比亚谦比希铜矿井下平巷TBM针对性设计研究[J]. 有色金属(矿山部分),2026,78(6):167-173.
Niu Xiong, Li Shenyuan, Yang Huiyun, et al. Research on targeted design of TBM for underground drifts in Chambishi Copper Mine, Zambia[J]. Nonferrous Metals(Mining Section), 2026, 78(6): 167-173.

赞比亚谦比希铜矿井下平巷TBM针对性设计研究

牛　雄[1],李深远[2],杨慧云[3],张　强[2],乐容昌[3],张九宇[1],周小利[1]
(1. 湖北中色矿山工程技术有限公司,武汉 438021;
2. 中国铁建重工集团股份有限公司,长沙 410100;
3. 中国十五冶金建设集团有限公司,武汉 430075)

摘　要: 赞比亚谦比希铜矿是中非合作标杆矿业项目。东南二期井下平巷工程围岩以f12～f14超高硬度石英岩、花岗岩为主,应用全断面岩石隧道掘进机(TBM)是提升施工效率的有效途径之一。本文结合井下平巷工程特殊需求,从地质适应性、施工安全等维度研究TBM选型适应性及TBM的适配应用与施工关键技术。同时结合以往工程经验重点研究矿用TBM在硬岩、高温、小转弯复杂线路等工况下刀盘、支护系统、出渣系统等方面的针对性设计以实现TBM在谦比希井下平巷的快速掘进。本研究为后续同类复杂矿山工程推广TBM机械化掘进、实现绿色高效施工提供了可靠的实践参考与技术借鉴。

关键词: 铜矿平巷工程;矿用TBM;小转弯;硬岩;高地温
中图分类号: TD421. 5;TD853　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1671-4172(2026)06-0167-07

Research on targeted design of TBM for underground drifts in Chambishi Copper Mine, Zambia

Niu Xiong[1], Li Shenyuan[2], Yang Huiyun[3], Zhang Qiang[2], Yue Rongchang[3], Zhang Jiuyu[1], Zhou Xiaoli[1]
(1. Hubei CNMC Mine Engineering Technology Co., Ltd., Wuhan 438021, China;
2. China Railway Construction Heavy Industry Corporation Limited, Changsha 410100, China;
3. China 15th Metallurgical Construction Group Co., Ltd., Wuhan 430075, China)

Abstract: The Chambishi Copper Mine in Zambia is a benchmark mining project of China-Africa cooperation. The surrounding rock of the underground drifts in the Phase II Southeast project is dominated by extremely hard quartzite and granite with a hardness coefficient of f12—f14, for which the application of full-face Tunnel Boring Machines (TBMs) is one of the effective approaches to improving construction efficiency. In view of the specific requirements of underground drift engineering, this paper investigates the adaptability of TBM selection and the adaptive application and key construction technologies of TBMs from the perspectives of geological adaptability and construction safety. Meanwhile, drawing on previous engineering experience, this study focuses on the targeted design of the cutterhead, support system, and muck removal system of mining TBMs under working conditions such as hard rock, high temperature, and complex alignments with small-radius curves, so as to achieve rapid TBM tunneling in the underground drifts of Chambishi. This research provides a reliable practical reference and technical experience for the wider application of mechanized TBM tunneling and the realization of green and efficient construction in similar complex mining projects in the future.

Key words: copper mine drift engineering; mine-used TBM; small turning radius; hard rock; high ground temperature

收稿日期:2026-06-29
作者简介:牛　雄,工程师,主要从事金属矿山安全高效开采工艺技术及装备研究与应用、矿山生产管理和企业经营管理。

全断面岩石隧道掘进机(Tunnel Boring Machine,简称“TBM”),是一种集掘进、出渣、导向、支护、通风、防尘等多功能为一体的大型高效隧道施工机械,被广泛应用于各种硬岩隧道的掘进作业[1]。矿用TBM作为一种适用于矿山巷道快速施工的先进设备,具有掘进效率高、开挖质量好、对围岩扰动小、施工安全性高等优点,在地下矿山开采巷道施工中具有优势[2-3]。

赞比亚谦比希铜矿为中色非洲矿业有限公司核心矿山,是中非合作标志性矿业项目,矿区整体由主矿体、西矿体、东南矿体三大矿区组成。其中,东南矿体为矿区重点扩建板块,东南矿体整体采用“分期建设、分区开采”模式,分为一、二期两大建设阶段,其中900 ml、1 080 ml中段巷道为二期2、3号矿体开采的核心开拓巷道,也是本次TBM施工的主要作业区域。

东南矿体核心开拓巷道存在巷道施工距离长,围岩单轴饱和抗压强度高、巷道穿越破碎带、高地温的工程地质特点,其中掘进巷道总长约9 km,围岩主要为上下盘石英岩、下盘砾岩、基地花岗岩、矿化板岩等,围岩强度为f12—f14。施工过程中还需穿越破碎带,同时巷道设计伴随-7°下坡*R*80 m的小转弯螺旋掘进,存在40 ℃的地下高温。针对矿用TBM用于金属矿山长距离巷道施工时面临的工程难点,近年来涌现出包括TBM选型、地质超前预报、刀具磨损监测在内的多维度研究成果,形成了较为完整的施工技术体系。杜闯东等[4]的研究表明,TBM选型的合理性对地质条件复杂、超长隧道开挖的掘进效率十分重要。程志等[5]从矿山TBM作业线成套装备、随掘随探技术和掘进参数智能控制3个方面介绍了矿山TBM未来发展趋势,开发满足TBM转弯和上下山掘进排渣要求的皮带机系统,研发TBM管线自动化接续设备,开发适合于TBM搭载的地质探测系统,以及基于人工智能算法的掘进参数智能控制系统。于丽等[6]通过引入空调工程中焓值的概念,确定TBM隧洞人工降温的冷负荷,对常见的降温措施进行对比讨论,进而确定TBM施工隧洞的降温措施。杜立杰等[7]从掘进时间利用率、施工速度、地质适应性等方面对新型敞开式TBM及主梁敞开式TBM进行了工程应用效果对比,建议完整或较完整围岩占比大、断层破碎围岩占比很小的小直径隧洞工程以及小转弯半径隧洞工程的施工,可选用新型双盾敞开式TBM。

综上所述,赞比亚谦比希铜矿东南矿体开拓巷道存在岩体较硬、围岩稳定性好、局部破碎的地质特点,又存在螺旋小转弯下坡掘进及高地温的客观工程难题。因此,亟需对巷道施工TBM装备进行创新性与针对性设计以满足实际工况需求。本文结合当前TBM掘进机的功能特征,综合考虑地质、安全、高效、环境等多方面因素,对谦比希东南矿体开拓巷道工程所采用的TBM设备针对性设计展开研究。

1 工程适应性选型设计

TBM掘进技术经过近半个世纪的发展,已相当成熟,并且在结构上不断完善,按结构形式可分为敞开式、单护盾、双护盾和具有盾构与硬岩掘进机双模式TBM等不同类型,以适应不同的地质条件[8]。5种常用类型的全断面岩石隧道掘进机所适应的地层、支护方式以及优缺点对比见表1。TBM选型的合理性对缩短工期、降低施工风险、节约成本起着重要作用[9-11]。根据本工程地质条件及支护需求选用敞开式TBM,目前矿用敞开式TBM主要可分为主梁敞开式TBM及新型敞开式TBM两种。

主梁敞开式TBM主机部分一般由刀盘、主驱动、护盾、主梁、鞍架、撑靴组成,通过撑靴支撑在开挖的巷道岩壁上产生的摩擦力来提供刀盘掘进的推进力,通过鞍架上扭矩油缸进行调向掘进,主梁敞开式TBM大致结构如图1所示。主梁敞开式TBM适应地层一般要求围岩条件较好,中硬岩、坚硬岩、极硬岩、单轴抗压强度f5—f30,一般开挖围岩为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ类及部分Ⅳ类围岩。主梁敞开式TBM具有护盾短,超前钻孔灵活,结构简单,应急处理灵活的特点,可适用于坡度±15°、转弯半径≥100 m的巷道施工。

新型敞开式TBM是结合敞开式TBM和双护盾TBM优势开发的新型敞开式掘进机,主机部分一般由刀盘、主驱动、前盾、伸缩盾、撑紧盾组成,通过撑紧盾的撑靴撑紧巷道岩壁来提供刀盘掘进的推进力,通过主推进油缸的压力调节进行掘进调向,新型敞开式TBM大致结构如图2所示。新型敞开式TBM适应地层相对较广,适应软岩、中硬岩、坚硬岩等Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ类及部分Ⅳ类围岩,最适合单轴抗压强度f7~f16的岩体。新型敞开式TBM主机采用铰接结构,可适应更小转弯半径,转弯半径≥30 m巷道施工都可满足。

表 1　不同类型 TBM 适应性对比

Table 1　Comparison of adaptability of different types of TBM

类别	地质条件适应性	支护形式	优点	缺点
单护盾 TBM	主要应用于地质松软地层，即围岩稳定性差，单轴抗压强度在 5～60 MPa 以下的Ⅳ、Ⅴ类围岩	管片支护	采用刚性护盾和管片连续支护可应对小范围软弱围岩、护盾较短不良地质超前处理相对方便	刚性盾体在围岩收敛大变形地层被卡风险较大
双护盾 TBM	适应地层较广，岩石为软岩、中硬岩、坚硬岩，单轴抗压强度在 20 MPa 以上，岩体较完整至破碎都可适应，可适用于地质条件以Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ类围岩为主的隧道，但当遇到破碎带和膨胀性围岩、地应力大而导致围岩变形时有卡机风险	锚网索喷支护、管片支护	在双护盾模式下，隧道掘进和管片拼装可以同时进行，施工效率高	较长，在围岩收敛大变形地层被卡风险大、不良地质超前处理不便
敞开式 TBM	适应地层一般要求围岩条件较好，岩石为中硬岩、坚硬岩、极硬岩，单轴抗压强度在 50 MPa 以上，岩石稳定性要求较高，较适合地质条件以Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ类为主的隧道	锚网索喷支护	在稳定地层掘进性能较高、可移动的分体式护盾可灵活应对围岩收敛变形	在围岩不稳定地层敞开式的作业环境人员作业风险大、围岩支护工作量大
土压 /TBM 双模	渗透性低的土岩交互复杂地层	管片支护	在稳定的岩层可以发挥 TBM 快速掘进的性能、在不稳定的土层可以发挥盾构 安全掘进的性能	设备配置复杂且昂贵、模式转换繁琐且耗时
泥水 /TBM 双模	既适用低渗透性的黏性土地层，又适应高水压、高渗透性地层	管片支护	在稳定的岩层可以发挥 TBM 快速掘进的性能、在高渗透和高水压的土层或碎裂岩层可以发挥盾构安全掘进的性能	设备配置复杂且昂贵、模式转换繁琐且耗时

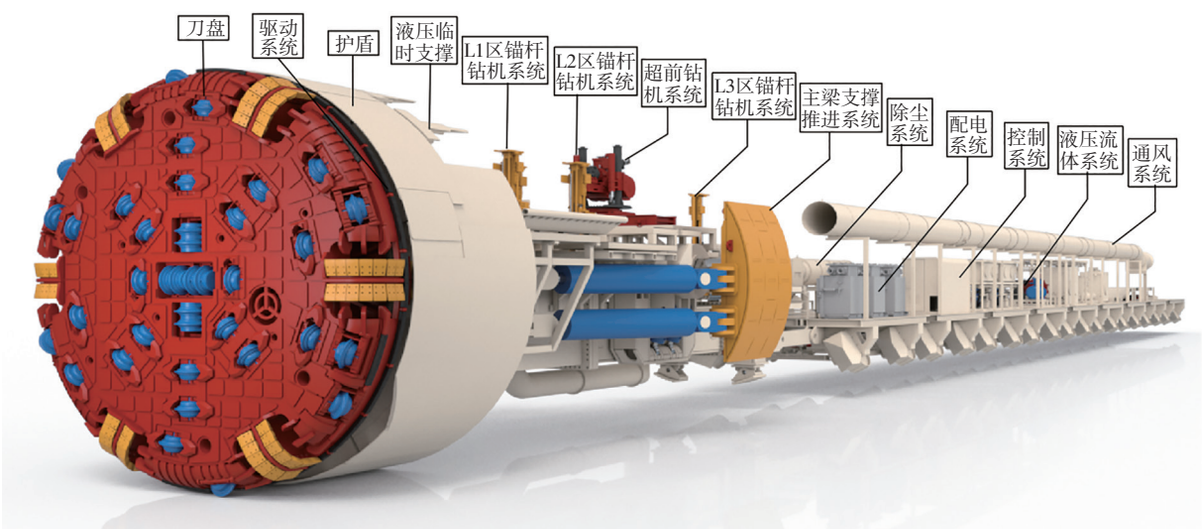


图 1　主梁敞开式 TBM

Fig. 1　Main beam open-type TBM

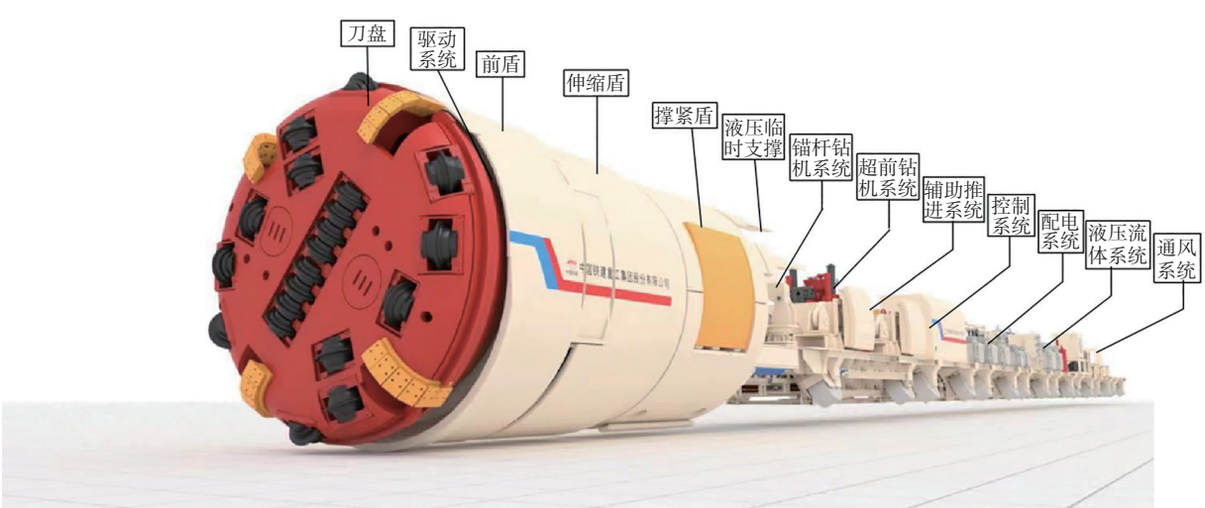


图 2　新型敞开式 TBM

Fig. 2　New type open TBM

主梁敞开式TBM主梁刚性结构较长，无法满足本工程R80 m螺旋下坡转弯需求，新型敞开式TBM盾体长度短，可进行小转弯设计，转弯半径最小可达30 m。本工程巷道主要穿越岩层岩性是花岗岩，围岩整体情况较稳定，强度为f12—f14，局部围岩存在断层破碎带，整体围岩地质情况符合敞开式TBM施工要求。综合考虑巷道转弯半径要求最小R80 m且整体围岩情况较好，采用新型敞开式TBM更符合本工程施工要求。

2 工程TBM基于以往经验优化设计

结合以往矿用TBM应用所面临的支护功能缺失、盾体内部撒渣严重、软岩地层无法换步等问题，针对性地在本工程TBM上进行改进，配置适应本工程的钢筋排支护系统、钢拱架撑紧机构、法向锚杆钻机组成的快速支护系统，双撑紧系统满足软弱围岩地层的快速换步掘进，全圆封闭式盾体设计适应小转弯且有效防止盾体积渣，整机采用无轨行走省却常规TBM的铺轨工序以节省人力物力，配置办休一体化人性化设备改善井下作业空间，从而使TBM可在本工程快速掘进。

2.1 改进临时支护功能单元

针对本工程可能遇到的断裂破碎带地层，TBM配置钢筋排支护系统、锚杆钻机、钢拱架拼装机及辅助撑紧系统，提高了TBM在破碎带地层的支护能力，保证TBM可快速高效地通过不良地质段。

1)钢筋排支护系统

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，如图3所示。配合应急喷混、拱架系统，快速通过短距离断层破碎带。



图3 钢筋排支护系统

Fig. 3 Reinforced steel support system

2)锚杆钻机系统

现场围岩主要为f12—f14，整体为硬岩地层，综合对比风动钻机、液压冲击式锚杆钻机、液压旋转式锚杆钻机等几种钻机，选用在坚硬岩层钻孔效率较高的液压冲击式锚杆钻机。锚杆钻机系统位于撑紧盾后方，可与TBM掘进机开挖平行作业。锚杆钻机居中布置，回转中心为TBM开挖隧道中心，绕隧道中心旋转后锚杆钻机施工钻杆朝向均为法向，施工范围可覆盖顶部180°范围。

3)钢拱架安装系统

配置可径向伸缩的撑紧臂结构，具备灵活的径向调节能力，可适配工字钢、H型钢等多种常规支护型钢拱架的安装施工，如图4所示，适用性较强。初始安装阶段仅完成隧道3/4圆周范围的拱架支护安装，预留底部施工空间。针对未封闭的底部区域，采用手持钻机施作锁脚锚杆的方式对已安装拱架进行锚固固定，有效保障拱架安装后的整体稳定性与支护刚度。待施工设备完全通行、作业空间满足施工条件后，再对底部空缺部位进行钢拱架全圆闭合成型。

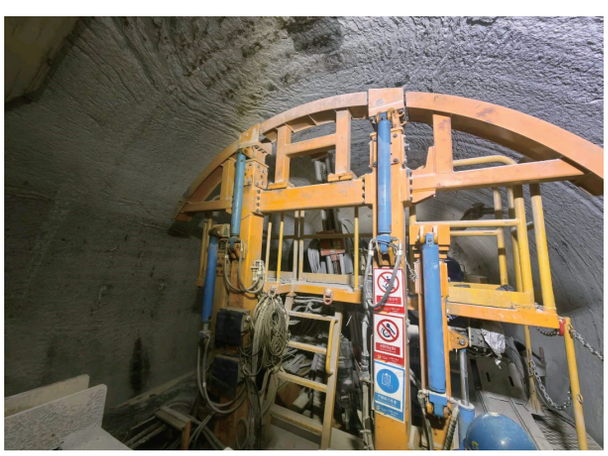


图4 拱架拼装机构

Fig. 4 Arch frame assembly mechanism

2.2 双撑紧系统配置

新型敞开式TBM换步作业时，由前盾稳定器抵紧隧道洞壁形成支撑，再借助推进油缸牵引撑紧盾完成整机换步动作。常规TBM所配备的稳定器结构尺寸偏小，设备穿越围岩破碎带时，易出现换步受阻、作业失效等问题。

针对该工况痛点，本项目对前盾稳定器进行优化设计，通过提升其支撑面积与撑紧作用力，有效强化设备在复杂地层中的换步性能。与此同时，整机增设辅助撑靴系统，当前盾稳定器所提供的摩擦阻力不足时，可由拖拉油缸驱动辅助撑靴输出附加推力，

协同主机完成换步作业，进一步提升设备对破碎围岩地层的适应性。

2.3　全圆封闭式盾体设计

常规小直径新型敞开式 TBM 为适应小转弯，前盾与撑紧盾之间为指型结构，中间存在间隙，顶部岩渣掉落，人员清理不便，本工程中伸缩盾与前盾尾壳采用封闭式全圆壳体设计，可以有效防止盾体积渣，同时盾体之间预留间隙，满足现场转弯掘进需求。

2.4　整机无轨行走

常规 TBM 施工时，后配套行走在钢轨上，每掘进一定距离之后设备需停机等待人员进行钢轨运输铺设作业，钢轨运输铺设作业极大影响施工效率，同时也加大工人劳动强度，耗时耗力。

有鉴于此，本工程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，中间预留通道，满足胶轮车物料运输，如图 5 所示。目前，大钢轮行走技术已广泛应用于各大煤矿矿用 TBM，如淮南谢桥矿、淮南张集矿、陕西正通煤矿、陕西亭南煤矿等。



图 5　拖车大钢轮行走

Fig. 5　Trailer with large steel wheels moving

2.5　办休一体化

充分考虑井下人员施工人性化设计，在常规 TBM 功能基础上增设淋浴间、休息室等人性化设备，实现井下作业办休一体化，有效改善井下作业环境。

3　长距离硬岩快速掘进针对性设计

本工程 TBM 掘进巷道总长约 9 km，属于典型的“长距离深井硬岩掘进工况”。巷道围岩坚固性系数稳定在 f12～f14 区间，属于极高硬度岩体，对 TBM 主机刀盘结构强度、刀盘刀具耐磨性、主驱动系统的性能与稳定性提出了极高要求。

3.1　刀盘针对性设计

刀盘是 TBM 关键部件，刀盘质量的好坏是影响 TBM 掘进效率和施工成本的决定性因素之一。针对本工程长距离掘进及硬岩地质情况，刀盘正面和后锥面焊接耐磨复合板，该复合板宏观硬度达到 58～62 HRC，耐磨性能超强，经过实验室对比检测，其耐磨性能一般为普通中碳钢的 30 倍，是 Hardox400 耐磨板的 14 倍。所有耐磨复合板采用小块耐磨板设计，增加耐磨板和刀盘体焊接长度，亦可避免出现大块过度磨损情况，方便更换维护，如图 6 所示。

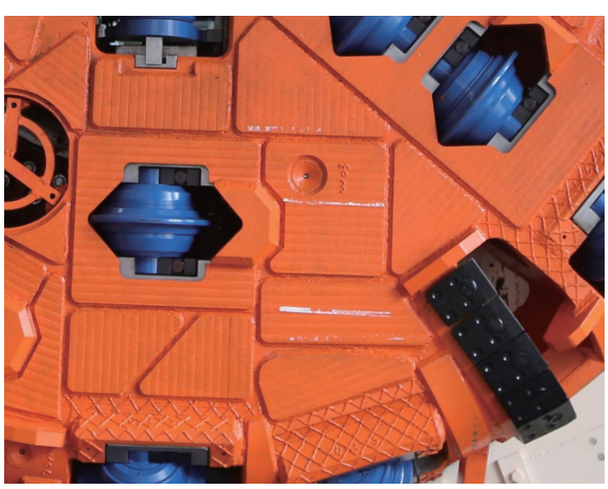


图 6　耐磨示意图

Fig. 6　Schematic diagram of wear resistance

针对刀盘正面单刃滚刀，为保护滚刀刀毂，顺刀盘转动方向设置滚刀保护块。滚刀保护块采用双层设计，上层为复合耐磨板，增强保护块的耐磨性，下层为焊接性能更好的结构钢，增强与刀盘体之间的焊接牢固度，确保在掘进过程中不易被撞击脱落。

大圆环外周采用三排式镶嵌合金耐磨环结构，耐磨环基体选用焊接性能优良的结构钢，非合金区域堆焊 3～5 mm 耐磨层；合金块采用高耐磨材质，并通过银基钎焊工艺与刀体牢固结合，接头抗剪强度可达到 260 MPa 以上，显著提升大圆环外周耐磨能力。

3.2 大扭矩冗余针对性设计

针对硬岩地层中TBM掘进时阻力大、贯入度小的情况并结合加大刀盘转速可有效加快TBM的掘进效率的客观规律,本工程针对性地配备主驱动减速机及高转速电机,使刀盘最高转速达到12 r/min,额定扭矩达到2 415 kN·m,脱困扭矩达到3 622 kN·m,有效保证TBM在遇到硬岩地层时的掘进效率。

3.3 连续皮带机出渣设计

为保障TBM快速掘进,本设备配套了高效连续皮带机出渣系统。相比传统有轨与无轨出渣技术,连续皮带机出渣系统具有连续出渣效率高、成本低、故障率低等优点。并且还具有运距长、运量大、适配小空间的特点,这些特点与谦比希巷道长距离小直径的施工高度适配,能够有效保证TBM快速掘进时的出渣效果。

4 主机及后配套小转弯针对性设计

针对本工程R50m的小转弯,采取了包括刀盘扩挖技术、主机姿态控制技术、预留大安全间隙等一系列技术,以保障小转弯的顺利通过。

刀盘通过更换大尺寸刀圈+垫块,可实现半径方向50 mm的扩挖,便于主机姿态的调整。

主机采用多段铰接结构+油缸分区液压锁技术,确保TBM主机按预定转弯姿态通过转弯段。

护盾可伸缩+后配套安全通过技术,护盾为适应转弯掘进采用可伸缩设计,后配套设备设计时预留450 mm距离洞壁的安全间隙,平台边缘人员通行处进行可折叠设计,确保拖车安全通过小转弯段。

5 高地温针对性设计

针对本工程高地温及长距离掘进设备散热问题采用了制冷设备与高效二次风机相结合的方案。设备通过匹配高功率二次通风设备与模块化水冷制冷系统,构建适配井下狭小作业空间、高温恶劣工况的综合降温体系。

通风系统方面,依托高功率二次送风设备保障巷道空气快速流通,为作业区域空气置换提供稳定风量支撑。

降温制冷系统方面,配套1台315 kW无级可调式水冷空气冷却设备,可根据井下实时温度动态调节运行功率,实现作业区域温度的精准调控。该方案在施工供水系统进水水温不超过25 ℃的情况下可将洞外供风降低8~10 ℃后送至前方。

6 结论

赞比亚谦比希铜矿是具有代表性的金属矿山,其巷道采用TBM施工在矿山开采行业也具有重要意义。本文针对谦比希铜矿巷道小转弯、长距离硬岩、10%破碎带等条件,通过设备针对性选型及地质适应性针对设计构建了金属矿山巷道TBM长距离硬岩掘进选型设计的参考案例。

1)本研究通过对比分析各类掘进机的地质适应性能,总结归纳了多种机型的适用地层范围及其技术特性,为工程实践中掘进机的科学选型提供了理论依据。基于东南矿体核心开拓巷道的地质和施工特点,论证了新型敞开式TBM选型方案的合理性,为后续其他类似工程实施提供了技术参考。

2)针对巷道围岩含10%裂隙破碎带的特点,本研究对TBM进行了专项优化设计。在破碎带适应性方面,强化了支护体系,设计了钢筋排、拱架、锚杆支护的协同支护系统,该针对性设计显著提升了TBM设备在破碎带地层的施工安全性和掘进效率。针对破碎带设备换步困难的问题,针对性设计了辅助撑紧系统,有效解决了破碎带施工中常见的设备前盾稳定器撑不住导致换步困难的技术难题,确保了TBM在长距离复杂地质条件下的可靠性和通过性。

3)本研究在谦比希东南矿体巷道长距离硬岩TBM设计中对刀盘等易磨损部件进行了针对性设计,为应对高地温施工环境创新使用制冷设备配合高效二次风机的方案,针对巷道空间小快速掘进需保障出渣的特点,提出了大钢轮免铺轨后配套拖车行走设计,匹配连续皮带机实现TBM连续掘进出渣。这些针对性设计及方案提高了TBM用于金属矿山巷道长距离硬岩掘进的地质适应性,并为其他金属矿山巷道TBM施工及设计提供重要参考。

谦比希东南矿体巷道工程TBM的针对性设计解决了巷道施工中新型敞开式TBM过破碎带地层支护难、换步难的问题,同时针对小转弯长距离硬岩掘进的针对性设计保障了设备施工的安全高效。这些设计对谦比希东南矿体巷道的建设具有重要意义,并且为同类复杂矿山工程推广TBM机械化掘进、实现绿色高效施工提供了可靠的实践参考与技术借鉴。

参 考 文 献

[1] 李宗林,李庆楼,张立龙,等. 敞开式TBM隧洞围岩参数与主机振动相关性分析[J]. 隧道建设(中英文),2024,44(5):991-999.
Li Zonglin, Li Qinglou, Zhang Lilong, et al. Correlation analysis between surrounding rock parameters and mainframe

vibration of an open tunnel boring machine[J]. Tunnel Construction, 2024, 44(5): 991-999.

[2] 王振华, 彭勇, 王忠钊, 等. 复杂环境下城际铁路大直径双模盾构选型技术及应用[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(20): 8699-8706.
Wang Zhenhua, Peng Yong, Wang Zhongzhao, et al. Selection technology and application of large-diameter dual-mode shield for intercity railway under complex environment[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(20): 8699-8706.

[3] 鲁义强, 贺飞, 王明耀, 等. 深埋隧道敞开式TBM岩爆地层防控方法与护盾抗冲击研究[J]. 工程科学与技术, 2026, 58(1): 204-216.
Lu Yiqiang, He Fei, Wang Mingyao, et al. Prevention and control method of rock burst strata and shock resistance of shield with TBM in deep buried high stress tunnels[J]. Advanced Engineering Sciences, 2026, 58(1): 204-216.

[4] 杜闯东, 周路军, 朵生君, 等. 川藏铁路隧道TBM适应性选型分析及不良地质对策与思考[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(6): 897-912, 23-38.
Du Chuangdong, Zhou Lujun, Duo Shengjun, et al. Consideration of TBM adaptability and selection for Sichuan-Tibet railway tunnels and countermeasures for unfavorable geologies[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(6): 897-912, 23-38.

[5] 程志, 陈虎忠, 刘文学, 等. TBM在我国矿山巷道掘进中的应用现状与展望[J]. 建井技术, 2025, 46(2): 1-6.
Cheng Zhi, Chen Huzhong, Liu Wenxue, et al. Application status and future prospects of TBM in mine roadway excavation in China[J]. Mine Construction Technology, 2025, 46(2): 1-6.

[6] 于丽, 王晓亮, 王明年, 等. TBM施工引水隧洞降温技术研究[J]. 隧道建设(中英文), 2018, 38(11): 1778-1784.
Yu Li, Wang Xiaoliang, Wang Mingnian, et al. Study of cooling technology for long TBM water diversion tunnel[J]. Tunnel Construction, 2018, 38(11): 1778-1784.

[7] 杜立杰, 张正, 李青蔚, 等. 双盾敞开式TBM适应性与工程应用对比分析[J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(6): 921-928.
Du Lijie, Zhang Zheng, Li Qingwei, et al. Comparative analysis on adaptability and applications of double-shield open tunnel boring machines[J]. Tunnel Construction, 2023, 43(6): 921-928.

[8] 李旭辉, 周宁, 郭榕. 长距离复合地层输水隧洞工程掘进机选型研究[J]. 陕西水利, 2025(1): 152-154.
Li Xuhui, Zhou Ning, Guo Rong. Study on selection of roadheader for long-distance water conveyance tunnel in composite stratum[J]. Shaanxi Water Resources, 2025(1): 152-154.

[9] 贾连辉, 鲁义强, 贺飞, 等. 适应复杂多变地质隧道双结构TBM研制与应用[J]. 工程科学与技术, 2023, 55(2): 14-25.
Jia Lianhui, Lu Yiqiang, He Fei, et al. Development and application of dual-structure TBM for complex and changeable geological tunnels[J]. Advanced Engineering Sciences, 2023, 55(2): 14-25.

[10] 杜传奇, 邢鹏, 安龙飞, 等. 新型敞开式小直径TBM装备选型及应用[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(9): 137-147.
Du Chuanqi, Xing Peng, An Longfei, et al. Equipment selection and application of new open small diameter TBM[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(9): 137-147.

[11] 万鹏飞, 顾伟红, 翟强. 基于UMT-SPA法的TBM选型和适应性评价[J]. 武汉大学学报(工学版), 2023, 56(3): 329-336.
Wan Pengfei, Gu Weihong, Zhai Qiang. TBM selection and adaptability evaluation based on UMT-SPA method[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2023, 56(3): 329-336.