doi: 10. 20238/j. issn. 1671-4172. 2026. 06. 018
李金哲, 于露杨, 孙扬, 等. 多因素约束下金属矿深部区域 TBM施工巷道支护方案分析——以某铜矿为例[J]. 有色金属(矿山部分), 2026, 78(6): 184-190.
Li Jinzhe, Yu Luyang, Sun Yang, et al. Analysis on support scheme of TBM constructed drifts in deep metal mine areas under multi-factor constraints: a case study of a copper mine[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2026, 78(6): 184-190.

多因素约束下金属矿深部区域TBM施工巷道支护方案分析——以某铜矿为例

李金哲[1,2], 于露杨[1,2], 孙　扬[1,2], 吴之栋[1,2]
(1. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038;
2. 深部金属矿采动地压灾害防控国家矿山安全监察局重点实验室, 北京 100038)

摘　要: 深部金属矿山的开采面临着三高一扰动等问题, 使得深部工程巷道掘进存在巨大挑战。传统钻爆法施工具有作业不连续、人员长期暴露在工作面等缺陷, 难以满足矿山建设的要求, 采用隧道掘进机(TBM)进行长距离机械连续作业是深部金属矿山开挖巷道的现实趋势。本文以某国外地下铜矿为工程背景, 对影响TBM施工的主要因素进行分析, 计算发现: 1) 根据现有矿山生产系统的通风需求, 适配于斜坡道的TBM直径为8 m, 巷道净断面积为42. 1 m^2, 适配于竖井的TBM直径为10. 6 m, 巷道净断面积为78. 8 m^2。2) 本工程预测巷道最大涌水量为240 m^3/d, 不会对施工造成严重影响。3) 建模对比仅喷砼支护条件下的围岩变形, 按照一次TBM随机短锚杆配合100 mm喷砼支护＋二次TBM主机后锚索配合100 mm喷砼支护能够使巷道区域最大变形量降低30%以上。研究结果能够对其他相似深部金属矿的TBM施工支护方案选择提供依据与参考。

关键词: 深部金属矿; 隧道掘进机; 高地应力; 支护选择; 数值模拟
中图分类号: TD421. 5; TD803　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1671-4172(2026)06-0184-07

Analysis on support scheme of TBM constructed drifts in deep metal mine areas under multi-factor constraints: a case study of a copper mine

Li Jinzhe[1,2], Yu Luyang[1,2], Sun Yang[1,2], Wu Zhidong[1,2]
(1. China ENFI Engineering Corporation, Beijing 100038, China;
2. Key Laboratory of Ground Control Management Plan in Deep Metal Mines National Mine Safety Administration, Beijing 100038, China)

Abstract: Deep-seated metal mining is confronted with problems such as "three highs and one disturbance", which poses great challenges to roadway excavation in deep engineering. The conventional drilling-and-blasting method suffers from discontinuous operations and long-term personnel exposure at working faces, making it difficult to meet mine construction requirements. Adopting Tunnel Boring Machine (TBM) for long-distance continuous mechanical excavation represents a practical trend for roadway construction in deep-seated metal mines.Taking an overseas underground copper mine as the engineering background, this paper analyzes the main factors affecting TBM construction. Calculation results show: 1) Based on ventilation requirements of the existing mine production system, the suitable TBM diameter for ramps is 8 m with a roadway net cross-sectional area of 42. 1 m^2; for shafts, the suitable TBM diameter is 10. 6 m with a roadway net cross-sectional area of 78. 8 m^2. 2) The predicted maximum water inflow of roadways for this project is 240 m^3/d, which will not exert severe impacts on construction. 3) Numerical modelling comparing surrounding-rock deformation under shotcrete-

收稿日期: 2026-07-21
基金项目: 深地国家科技重大专项项目(2024ZD1003800)
作者简介: 李金哲, 从事非煤矿山井巷工程及岩石力学相关设计与研究工作。

only support indicates that the combined support scheme-primary support of TBM "driven random short rock bolts plus 100 mm shotcrete, followed by secondary support of anchor cables behind the TBM mainframe plus 100 mm shotcrete" can reduce the maximum deformation within the roadway zone by more than 30%. The research findings can provide basis and reference for TBM construction and support-scheme selection of other similar deep-seated metal mines.

Key words: deep metal mine; tunnel boring machine; high in-situ stress; support scheme selection; numerical simulation

随着目前浅部矿产资源逐渐枯竭，向地球深部找矿已是现实需求，深部开采也是我国金属矿产资源开发的大势所趋[1-2]。近年来，我国在隧道掘进技术与装备研发制造方面有长足进步，全断面隧道掘进机(Tunnel Boring Machine，TBM)已陆续在各地下矿山中逐渐得到应用并取得可喜的成绩[3-4]。相较于传统的钻爆法施工，TBM具备连续作业能力强、施工安全性高的突出优势，现已成为深部地下矿山巷道掘进的优选施工方案，应用优先级持续提升。

然而，深部矿山地质环境极为复杂，复杂的工程地质条件、水文地质条件、高地应力环境及断层破碎带等不良地质因素，会严重干扰TBM正常掘进施工，极易引发设备卡机等工程风险，制约了TBM在深部矿山工程中的安全高效应用[5]。目前，国内诸多学者已围绕TBM施工围岩控制与参数优化开展了大量研究。张基伟等[6]以高黎贡山隧道项目为工程依托，对比分析不同支护工况下巷道围岩变形特征，探究了锚杆滞后支护对围岩变形的影响机制，确定了合理的锚杆布设参数，完成了支护体系优化。陈弦等[7]对敞开式TBM掘进时的巷道稳定性及支护方案进行优化，通过数值模拟的手段探究围岩受开挖扰动后的变形特点，分析围岩塑性区、位移场及塑性场的演化规律，提出了适配于矿山现场的支护方案。孟佑强等[8]以实际的施工角度出发，对TBM隧道支护锚杆偏角进行分析，同时结合数值模拟和现场监测的数据总结出不同锚杆角度对拱顶及两侧区域的影响，为TBM 施工隧道的锚杆支护设计优化提供理论支撑。李智等[9]通过FLAC3D建立TBM穿越深埋断层破碎带的三维模型，考虑围岩应力－损伤－渗流耦合作用模拟施工过程中的围岩位移、塑性区、渗透系数及涌水量的变化规律，并提出以超前分段注浆方法进行围岩加固的方案。杨延栋等[10]通过对国内外多个隧道工程TBM 施工数据回归分析，建立了设备利用率、掘进速率等TBM施工性能指标随岩体质量的变化规律，提出了不同岩体质量隧道TBM施工性能评价方法，并根据现场实际TBM施工期间的数据对该方法进行验证。

上述研究为TBM掘进巷道的设计提供了重要参考，但针对金属矿山深部井下始发场景下的超大直径TBM开挖工程，目前尚未形成系统、完善的专项支护方案，难以满足复杂深部矿山的施工需求。基于此，本文以某国外深部铜矿为工程背景，综合考虑地应力、断层构造、地下水、围岩力学参数等多重深部复杂地质影响因素，结合深部围岩支护理论与有限元数值模拟分析结果，针对性构建适配超大直径TBM深部掘进的矿山巷道支护体系，可为同类深部矿山TBM施工工程提供技术参考与借鉴。

1　矿山概况

该矿山的地下矿体分为两阶段开采，目前已启动第一阶段的开采工作，采矿水平在地下千米以深区域，此阶段涵盖五条竖井承担采矿人员与设备进出、进风与回风，以及两条自地表延深的斜坡道承担矿石运输工作。为满足现有的生产指标，需要尽快开启二阶段的采矿工作，该区域位于现有水平约400 m以下，基于安全、连续、快速的施工掘进需求，拟采用TBM施工将两采矿水平相联通。

1.1　区域岩体性质及地应力分布特点

TBM施工区域内岩体主要为流纹岩、玄武岩、角闪黑云安山岩、石英二长闪长岩以及黑云母花岗闪长岩，根据RMR_{L90}的评分要求，这些岩体的得分均在44～48，为Ⅲ类围岩。此区域的最大地应力为70.2 MPa(水平应力，北偏西54°)，最小主应力33 MPa(水平应力，南偏东144°)。

1.2　区域断层构造分布

在TBM施工区域内，存在较为大量的断层构造，其中主要断层为：1)WBAT断层，为半愈合-角砾化陡倾断层，构成矿体西侧边界，该断层受到以下近东西向断裂构造的位移错动，分别为：Bumbat断层、Dugant断层、BOGD断层以及Lower断层；2)Dugant断层，一条横贯此区域的近东西向构造断层，该断层以发育交织状角砾岩带为特征，岩带厚度呈现局部变薄与增厚的变化，本断层对WBAT断层具有明显的位移错动作用；3)Bumbat断层：Bumbat

断层是一条横贯研究区域的近东西向构造。该断层以发育网状角砾岩带为特征，岩带厚度呈现局部收缩与膨大变化，且同样对WBAT断层具有明显的位移错动作用；4)BOGD断层组：该断层组以发育网状角砾岩带为特征，岩带厚度呈现局部收缩与膨大的变化特征，该断层导致区域中部岩性的显著位移，大部分位移表现为右旋走滑性质，可能兼具逆冲分量；5)北侧断层组(North Bound)，由薄层角砾岩带构成，表现出明显的位移错动或愈合特征。主要断层分布如图1所示。

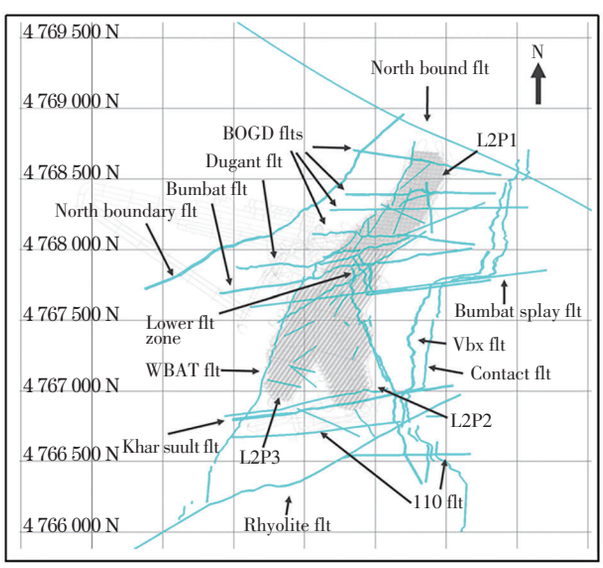


图1 矿区主要断层平面分布图

Fig. 1 The plan view of the main faults in the mining area

2 设计方案

本工程TBM巷道支护设计思路：在设计TBM开挖巷道的断面支护前，首先需要确定开挖断面尺寸进行TBM选型，再通过现行的地下矿山相关规范初步确定支护方案，同时结合水文条件与断层分布情况判断是否需要局部加强支护，最后通过计算与模拟确定最终的支护型式。

2.1 TBM开挖巷道断面设计

TBM开挖巷道的断面设计涵盖断面配置与支护两部分。断面配置主要与其功能和需风量有关，按照既有斜坡道和竖井的通风能力，已有进风井的净断面为78.5 m^2，斜坡道净断面为42 m^2，TBM线路净断面积不应小于与其相连接巷道的最低需风要求。基于此通风要求，经过多轮方案布置比对，将矿山现有的运输设备纳入断面布置，分别得到适配与斜坡道相连的方案Ⅰ以及与竖井相连的方案Ⅱ。确定与斜坡道相连的TBM直径为Φ8.0 m，与竖井联通的TBM直径为Φ10.6 m。两套TBM断面方案的参数与断面设计见表1和图2所示。

表1 TBM断面设计方案

Table 1 Options of TBM tunnel

方案	TBM直径Φ/m	净断面积/m^2	备注
Ⅰ	8.0	42.1	与现有斜坡道相接
Ⅱ	10.6	78.8	与现有竖井相接

2.2 TBM线路选择

2.2.1 水文条件分析

该矿区地下水主要接受大气降水补给，大气降水入渗补给冲积含水层和风化基岩含水层后以水平径流为主，以带状形式或泉水形式排泄。少部分地下水沿断裂构造向深部垂向径流，受深部新鲜基岩地层渗透性和导水性的限制，深部地下水流动缓慢。矿区基岩地层由岩浆岩和沉积岩组成，根据目前已开拓

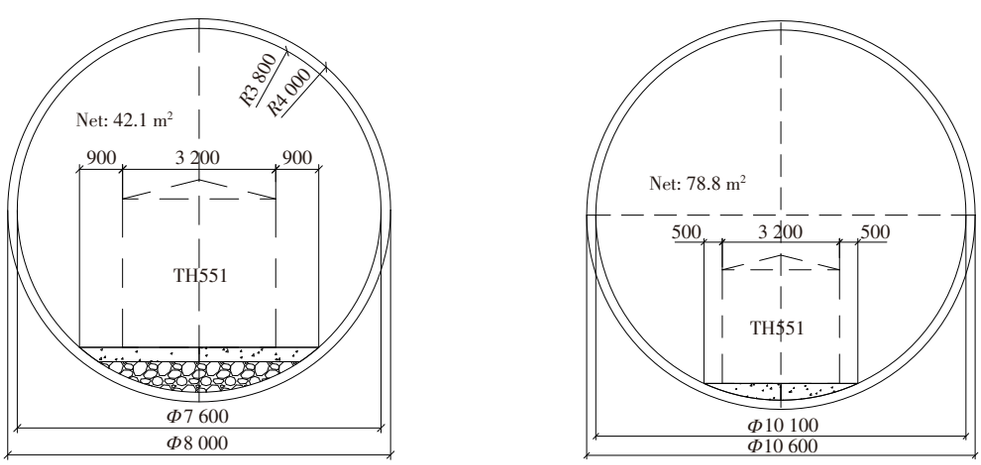


图2 TBM开挖断面图(单位：mm)

Fig. 2 Section for TBM tunnel (Unit: mm)

至现有采矿中段的实际条件，尚未发现明显地下水。

依据矿区水文地质条件和TBM施工方案，本次涌水量预测选用水平廊道法潜水涌水量计算公式，涌水量计算公式如下：

$$Q=B\times K\times\frac{h_1^2-h_2^2}{2R} \tag{1}$$

$$R=2S\times\sqrt{(h_1\times K)} \tag{2}$$

式中：B为巷道长度，m；K为渗透系数，m/d；h_1为含水层底板到静止水位的高度，m；h_2为水柱高度，m；R为影响半径，m；S为水位降深，m。

根据现场实际条件，TBM巷道施工涌水量预测为240 m^3/d，不会对施工造成较大影响，因此，在断面支护上未对此影响因素进行特殊处理。

2.2.2　断层条件分析

基于现有的工程地质条件，结合区域内主要断层的分布情况(图1)，对TBM的施工线路进行布置，TBM线路应尽量远离断层，无法避开时也应尽量减少与断层的交叉。以方案1的TBM线路为例，该线路与已有的斜坡道相接，通过调整转弯半径与胶带的头部驱动及尾部拉紧装置的空间布置，确定出仅穿越两次主要断层的线路，如图3所示。

2.3　TBM掘进巷道支护选择

2.3.1　巷道支护方案选择

本工程施工区域岩体质量总体为Ⅲ级，根据《岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范》(GB 50086－2015)[11]内隧洞与斜井的锚喷支护类型和设计参数(表7.3.1-1)的相关要求，结合项目的工程地质条件分别对两种直径TBM的巷道支护进行设计。

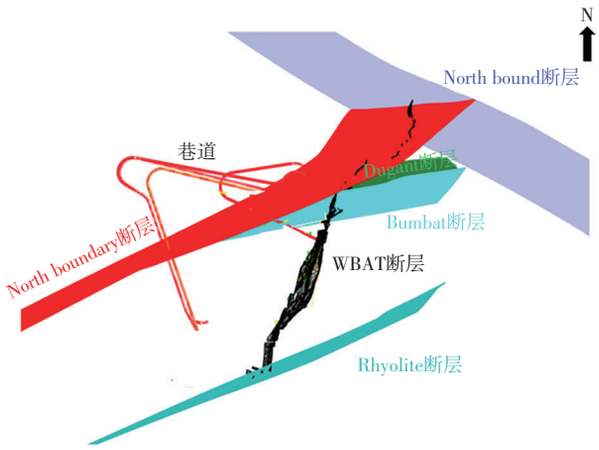


图3　TBM线路与断层的位置关系图

Fig. 3　The relationship between the TBM route and faults

基于本工程最大埋深位于1 500 m以下区域、最大水平应力超过70 MPa的现实条件，支护型式拟按照两次锚网喷支护考虑。巷道支护采用一次TBM随机短锚杆＋100 mm喷砼支护，二次TBM主机后长锚杆(锚索)＋100 mm喷砼支护的支护方案，断面两次支护厚度均按照200 mm考虑，结合收敛约束法的理论研究和现有的大断面TBM工程的实际施工情况，方案Ⅱ预留100 mm巷道允许收缩变形量。

2.3.2　巷道支护方案模拟分析

根据图4的支护方案，利用有限元软件MIDAS GTS NX进行建模，如图5所示，为消除边界约束对模拟结果的影响，巷道周边的围岩区域为10倍的TBM巷道开挖直径。分别对两种直径的TBM进行巷道支护模拟，以仅喷砼的支护型式作为对照组，将其与两次喷砼＋短锚杆＋长锚索的支护方案进行对比分析以探究支护的合理性。

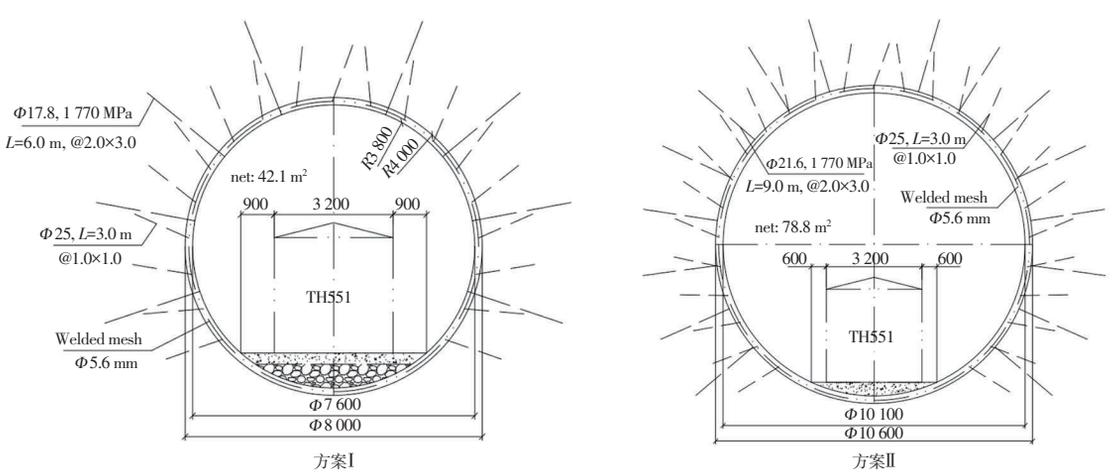


图4　TBM巷道支护方案图(单位：mm)

Fig. 4　Support design of TBM tunnels (Unit: mm)

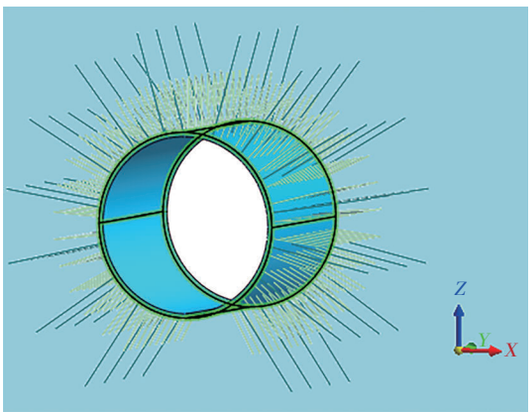
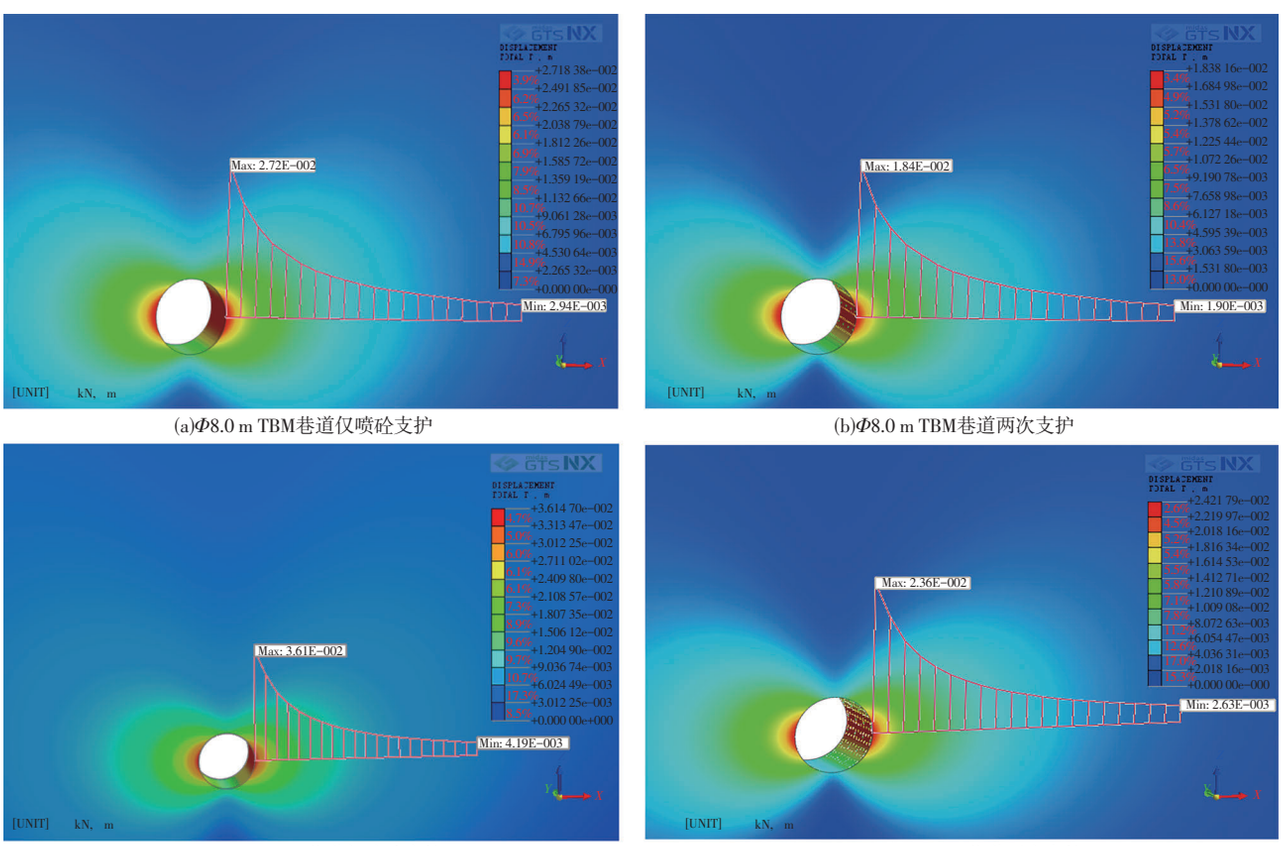


图5 TBM巷道支护建模

Fig. 5 3D model of TBM tunnel

分别对两种尺寸的巷道进行开挖卸荷模拟，为保证结果的真实性，在施工阶段分析步内先进行地应力平衡作业，再模拟TBM巷道开挖与支护工况，得到的结果如图6所示。开挖支护工序作业完成后，巷道周围形成开挖扰动圈，超出扰动圈后原岩基本保持初始的原岩应力，变形量极小，位移云图结果呈左右对称的“蝴蝶形”分布，沿巷道水平X方向延展范围远大于竖直Z方向，说明最大主应力为沿着X方向的水平应力，开挖分析步结束后，巷道受水平方向挤压作用更强，两侧围岩变形显著。模拟结果对称地向远部区域逐渐衰减，直至可忽略不计，说明此模型中巷道区域的结果不受边界约束影响，结果具有研究意义。

根据图6模拟结果，临近巷道区域属于位移陡降段，此区域位移值变化较大，随着围岩与开挖区域的距离增加，位移值变化的曲线斜率开始放缓直至逐渐趋于稳定。以Φ8.0 m TBM巷道为例，仅喷砼支护时巷道侧壁位置最大变形量为27.2 mm，沿着水平方向变形量逐渐降低，在距离硐壁约35 m位置时其变形量不足3 mm。此时主要影响区(图6(a)红色区域)分布在巷道侧边约1 m左右，次要影响区(图6(a)黄色区域)在1～2 m内，该断面采用长度为3 m的短锚杆一次支护＋6 m的锚索二次支护，其支护锚杆端部位于影响区外部，说明此支护型式合理。对比两次支护条件下的巷道围岩变形结果，发现施加锚杆与锚索支护后，其主要影响区(图6(b)红色区域)范围缩减为距离巷道侧壁0.5 m以内，次要影响区(图6(b)黄色区域)同步缩减至0.5～1.6 m范围内，支护效果明显。为直观描述模拟结果，将各工况条件下位移



(a)Φ8.0 m TBM巷道仅喷砼支护　(b)Φ8.0 m TBM巷道两次支护

(c)Φ10.6 m TBM巷道仅喷砼支护　(d)Φ10.6 m TBM巷道两次支护

图6 TBM巷道的围岩位移结果

Fig. 6 Results of surrounding rock displacement for TBM tunnel

云图结果输出，得到沿X轴方向的位移变化曲线，如图7所示。

根据图7的结果，当采用Φ8.0 m TBM和Φ10.6 m TBM开挖巷道时，两次支护条件下的巷道侧壁最大位移量相较于仅喷砼支护工况分别降低了32%和35%，支护效果较为明显。对于Φ8.0 m TBM，在X轴方向距离巷道侧壁约34 m位置时不同工况的围岩位移近乎一致，位移值可忽略不计，说明该区域以外可视为原岩应力区，而Φ10.6 m TBM开挖巷道的原岩应力区近似位于距离巷道侧壁约42 m以外，说明TBM的开挖直径会对周围岩土体的应力重分布造成影响，开挖直径与影响区范围呈现出正相关。

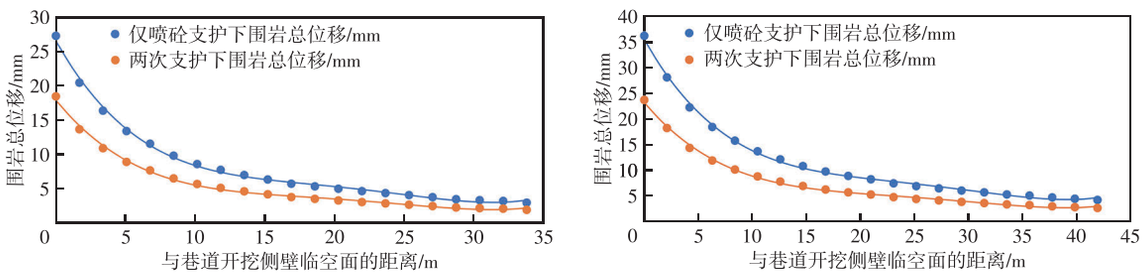


图7　巷道位移对比分析

Fig. 7　Comparative analysiss of tunnel displacement

将不同直径TBM开挖巷道的锚杆锚索支护结果进行对比，如图8所示。根据轴力图可较为直观的看出巷道两侧壁的一次喷锚支护锚杆承受的拉力最大，这是由于分析步施加步骤时，为贴合实际施工过程中的支护顺序，将开挖部分钝化时产生的不平衡力进行分步释放，设置荷载分布系数，在一次喷砼锚杆支护时释放一部分，而后在二次喷砼锚索支护时释放剩余部分，按照此施工次序，锚杆较锚索承受了更多的卸荷力，最大受力为134 kN，小于该型号锚杆的屈服强度(196 kN)和最大破断力(265 kN)，说明锚杆支护合理。

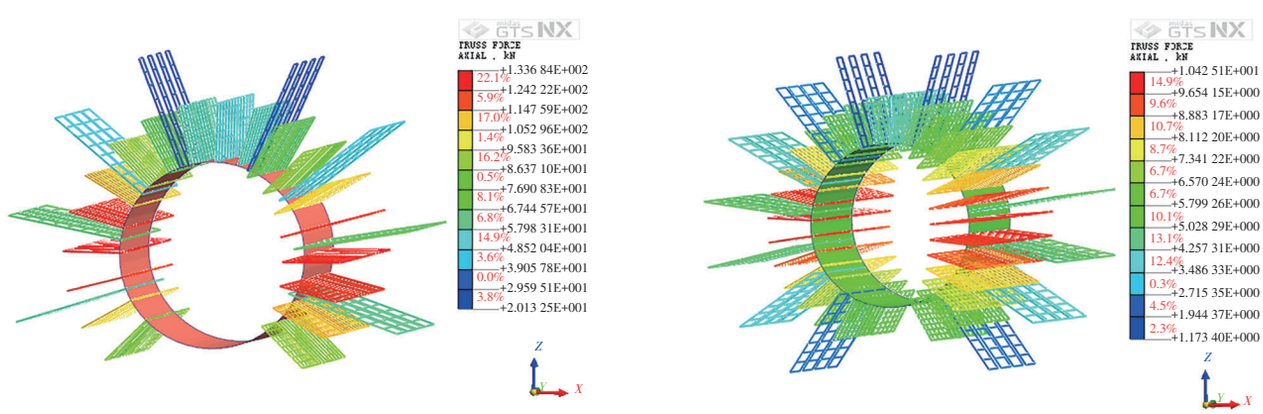


图8　锚杆轴力对比分析

Fig. 8　Comparative analysis of bolt axial force

3　结论

深部地下矿山的赋存条件复杂，不同矿山的实际工程条件具有很大的差异性，针对该项目的实际工程地质条件，进行TBM巷道支护方案的选择：

1)针对矿山现有生产系统的通风量需求，结合运输设备尺寸，分别配置出与斜坡道和竖井相连接的TBM断面。适配于斜坡道的TBM直径为8 m，巷道净断面积为42.1 m^2；适配于竖井的TBM直径为10.6 m，巷道净断面积为78.8 m^2。

2)按照现场的水文条件进行分析计算，得到TBM巷道施工时的涌水量预测值为240 m^3/d，根据相关的规范要求，该涌水量不会对施工造成较大影响，因此在断面支护上未对此项因素做特殊处理。

3)根据已探明的断层分布，在TBM线路选择时尽量避开断层所在区域，使得整条TBM线路基本处

于稳定的岩土体区域内，由此可避免由于频繁穿越断层而造成的未知风险。同时也能在施工阶段缩短工期。

4)通过建模计算得到巷道区域锚杆轴力的最大值与围岩最大位移值均出现在巷道两侧，说明此工程的巷道在深部应力作用下受水平主应力影响十分显著，施工阶段可根据现场实际揭露的围岩条件进行支护的调整。

5)相较于仅喷砼支护工况，按照一次TBM随机短锚杆配合100 mm喷砼支护＋二次TBM主机后长锚杆(锚索)配合100 mm喷砼支护方案计算的围岩主要影响区和次要影响区均有所收敛，巷道区域围岩最大位移值下降超过30%，支护效果显著。

参 考 文 献

[1] 蔡美峰，谭文辉，吴星辉，等. 金属矿山深部智能开采现状及其发展策略[J]. 中国有色金属学报，2021，31(11)：3409-3421.
Cai Meifeng，Tan Wenhui，Wu Xinghui，et al. Current situation and development strategy of deep intelligent mining in metal mines[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals，2021，31(11)：3409-3421.

[2] 李广，史志远，余洪伟. 金属矿山深井大规模提升关键技术装备进展与发展趋势[J]. 矿业研究与开发，2024，44(9)：1-8.
Li Guang，Shi Zhiyuan，Yu Hongwei. Progress and development trend of key technology and equipment for large-scale hoisting of deep wells in metal mines[J]. Mining Research and Development，2024，44(9)：1-8.

[3] 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.

[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] 刘泉声，潘玉丛，余宏淦，等. 深部金属矿山巷道TBM掘进技术应用现状及研究进展[J]. 有色金属(矿山部分)，2024，76(6)：25-41.
Liu Quansheng，Pan Yucong，Yu Honggan，et al. Application status and research progress of TBM tunnelling technology in deep metal mine roadways[J]. Nonferrous Metals (Mining Section)，2024，76(6)：25-41.

[6] 张基伟，张佳鑫，陈弦，等. TBM隧道锚杆滞后支护力学模型计算方法研究[J]. 铁道科学与工程学报，2025，22(12)：5444-5458.
Zhang Jiwei，Zhang Jiaxin，Chen Xian，et al. Research on the calculation method of the mechanical model for lagging support of TBM tunnel anchor bolts[J]. Journal of Railway Science and Engineering，2025，22(12)：5444-5458.

[7] 陈弦，刘垚，张基伟. 敞开式TBM掘进巷道围岩稳定性分析及滞后支护方案优化[J]. 金属矿山，2026(5)：90-101.
Chen Xian，Liu Yao，Zhang Jiwei. Stability analysis of surrounding rock and optimization of lagging support scheme for open-type TBM excavation roadway[J]. Metal Mine，2026(5)：90-101.

[8] 孟佑强，马文著，马昊，等. TBM隧道锚杆支护偏角对围岩变形的影响：以淮南张集矿TBM段巷道为例[J]. 科学技术与工程，2026，26(6)：2330-2337.
Meng Youqiang，Ma Wenzhu，Ma Hao，et al. Influence of anchor bolt support angles on surrounding rock deformation in TBM tunnels：TBM section of Zhangji mine in Huainan[J]. Science Technology and Engineering，2026，26(6)：2330-2337.

[9] 李智，董书宁，石志远，等. TBM穿越深埋断层破碎带突水灾变规律[J]. 煤田地质与勘探，2026，54(2)：161-171.
Li Zhi，Dong Shuning，Shi Zhiyuan，et al. Mechanisms behind water inrush disasters induced by TBM tunneling passing through deeply buried fault fracture zones[J]. Coal Geology & Exploration，2026，54(2)：161-171.

[10] 杨延栋，赵建兵，周建军，等. 不同岩体质量隧道TBM施工性能评价方法[J]. 科学技术与工程，2022，22(19)：8502-8508.
Yang Yandong，Zhao Jianbing，Zhou Jianjun，et al. TBM construction performance evaluation method of tunnels with different rock mass quality[J]. Science Technology and Engineering，2022，22(19)：8502-8508.

[11] GB 50086—2015岩土锚杆与喷射混凝土支护工程技术规范[S].
GB 50086—2015 Technical code for engineering of ground anchoring and shotcrete support[S].