

不良地质条件下金属矿山巷道 TBM 掘进围岩稳定性研究

张春虎¹, 周少兵², 刘荣乐¹, 孙志浩³, 李明睿¹, 范书恒⁴, 周新劼¹

(1. 中国瑞林工程技术股份有限公司, 南昌 330038; 2. 江西铜业股份有限公司, 南昌 330038;
3. 浙江大学建筑工程学院, 杭州 310058; 4. 中铁工程装备集团有限公司, 郑州 450016)

摘要: 针对江西某金属矿山在 TBM(tunnel boring machine)法施工过程中穿越不良地质时出现的大块岩石掉落问题, 基于 PLAXIS 3D 有限元仿真平台, 结合现场实际情况, 首次系统分析撑靴水平力对围岩拉伸破坏的影响机制, 并提出“超前注浆+锚网喷支护”的优化方案。研究表明, TBM 在 V 级围岩工况下施工, 围岩顶板出现拉伸破坏点, 并随着 TBM 的前进, 拉伸破坏区逐步发展, 导致工程中顶板垮塌现象。支护优化研究分析无支护、“钢筋网+锚杆+喷射混凝土”(以下简称锚网喷支护)和“超前注浆+锚网喷支护”三种工况。结果表明, 超前注浆加固方案显著提高围岩稳定性, 顶板最大变形量减少了 21.83%, 最终变形量减少了 36.72%。单独采用锚网喷支护效果有限, 但能有效限制围岩变形的自由发展, 并防止岩体松散掉落。建议在类似金属矿山巷道 TBM 穿越不良地质地段时, 采用超前注浆加固和锚网喷联合支护方案, 以提高施工安全性和效率。

关键词: 金属矿山巷道; TBM; 数值模拟; 不良地质; 围岩稳定性

中图分类号: TD35 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)12-0009-06

近年来, 随着人工智能等技术革新给全球经济带来新机遇, 新能源汽车等行业快速发展, 这推动了金属矿业全球范围内的蓬勃发展。为满足社会对矿产资源日益增长的需求, 金属矿山正在向大规模、大产能方向发展, 长距离深部金属矿山巷道掘进比例将大幅提高。传统钻爆法施工已经无法满足大规模矿山快速投产的需求。因此迫切需要一种能够适应金属矿山巷道快速掘进且安全的施工方法。

TBM(tunnel boring machine)是全断面硬岩隧道掘进机的简称, 施工过程集掘进、支护、出渣等施工工序于一体, 并行连续作业, 是目前最先进的隧道掘进机械。TBM 已广泛用于地铁、铁路、公路、水利等领域^[1-2], 并取得显著成效。由于其在隧道工程中的优势, TBM 应用于金属矿山中可显著提高效率、安全性和快速投产的能力。近年来, 学者们分析了金属矿山应用 TBM 法施工的可行性和优越

性^[3-6], 并付诸实践^[7-9]。这些研究主要集中在断面匹配、配套设施、TBM 设备的运输和组装以及施工经济性等方面, 尚未对 TBM 与围岩的相互作用方面进行深入探讨。

在 TBM 施工对围岩的影响方面, 交通、水利等领域的学者进行了大量的研究。方星桦等^[10]结合现场观测和数值模拟方法, 研究了高速公路隧道 TBM 施工时的围岩破坏情况, 并对支护方案进行了优化。任汀等^[11]在城市地下隧道 TBM 施工的数值模拟中研究了围岩变形和地表沉降的变化规律。王飞阳等^[12]基于 FLAC 3D 数值模拟软件, 对 TBM 施工过程中的围岩应力分布及弹性应变能进行研究, 并预测围岩可能发生岩爆的位置。周振梁等^[13]对 TBM 隧道围岩-支护相互作用建立力学模型, 分析掘进速度、喷混施作时机等支护参数对围岩位移的影响规律。

然而, 与公路、铁路和水利等领域相比, 金属矿

收稿日期: 2024-12-11

作者简介: 张春虎(1986—), 男, 江西靖安人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为井巷工程及岩土力学; 周少兵(1975—), 男, 江西南昌人, 工程师, 研究方向为采矿工程; 刘荣乐(1982—), 男, 湖南株洲人, 高级工程师, 研究方向为采矿工程、井巷工程及岩土力学等; 孙志浩(1993—), 男, 山东青岛人, 博士(后), 研究方向为岩土力学; 李明睿(1995—), 男, 江西南昌人, 硕士, 助理工程师, 研究方向为井巷工程及岩土力学; 范书恒(1990—), 男, 河南沁阳人, 工程师, 研究方向为采矿工程; 周新劼(1990—), 男, 江西南昌人, 硕士, 高级工程师, 研究方向为井巷工程及岩土力学。

山行业具有一些独特的特点,如地质勘探缺失、地质条件复杂、巷道半径较小以及施工工期紧迫等^[4]。这些特性使得其他领域的研究结果不一定适用于金属矿山。因此,本文以江西某金属矿山 TBM 巷道工程为依托,聚焦于金属矿山 TBM 掘进过程中的围岩破坏机理,提出以下关键研究:

(1)通过数值模拟与工程实例相结合,首次揭示撑靴水平力对围岩拉伸破坏的影响机制,并分析拉伸破坏塑性区的动态发展规律。

(2)针对围岩顶板垮塌和变形失稳问题,创新性地提出“超前注浆+锚网喷支护”联合支护方案。

(3)通过数值模拟分析,该方案在理论上显著改善了围岩稳定性和施工安全性,为类似工程提供可靠的理论参考和支护设计优化思路。

1 工程背景

1.1 工程概况

江西某大型金属矿山首采中段大巷采用钻爆法施工,由于井下作业环境差、围岩破碎等不利因素,施工速度缓慢,严重影响矿山投产日期。为加快施工进度,项目后续中段大巷的施工引进了 TBM 设备,成为江西首例使用 TBM 法施工井下巷道的金属非金属矿山。

目前,该项目已使用 TBM 完成一条中段大巷的掘进,巷道全长约为 2 km,平均月进尺约为 250 m。相比首采中段时的独头巷道施工速度(65 m/月),TBM 法虽显著提升了速度,但与理想的 TBM 掘进速度(800 m/月)相比,仍有较大差距。施工速度较慢的原因除了施工人员对矿山井下作业环境陌生,主要在于本矿区的岩性差,裂隙多,当 TBM 施工至不良地质段时,围岩顶板出现大面积垮塌,最大垮塌岩石长达 5 m(图 1)。大面积垮塌时,需要破碎大块岩石并清理大量的碎渣,TBM 才能继续前进,而且,超大块岩石掉落时甚至可能导致卡机事故,造



图 1 围岩顶板垮塌情况

成 TBM 长时间停机,严重影响基建工期。因此,有必要研究 TBM 掘进时围岩的破坏机理,并寻求支护优化方案。

1.2 不良地质概况

矿区场地属低山丘陵地貌,山体相对高度约为 70 m,坡度约为 40°,区域内地层发育不全,分布极不均匀。主副井钻孔揭露显示,矿区地层岩性自上而下以此有熔结凝灰岩、构造破碎带、凝灰质粉砂岩、钙质砂岩等岩性。中段大巷埋深约为 300 m,穿越地层中包含构造破碎带,该岩层以晶屑凝灰岩为主,节理裂隙极发育,内有泥质化物和岩石风化灰粉充填,属较软岩,岩体基本质量等级为 V,是 TBM 施工穿越的主要不良地质地段,图 1 中顶板垮塌现象即发生在这种岩体中。

2 TBM 施工数值模拟

2.1 模型建立

使用 PLAXIS 3D 有限元软件对 TBM 掘进矿山中段大巷进行仿真模拟,为减少计算时间,建立一半围岩和一半 TBM 相互作用的三维模型如图 2 所示,模型沿垂直巷道掘进方向取 50 m(x 方向)、沿巷道掘进方向取 60 m(y 方向)、沿竖直方向取 50 m(z 方向),这个模型尺寸足够大,可以消除模型边界约束与实际情况之间的差异带来的影响^[14-15]。本项目中段大巷埋深约为 300 m,模型顶部按上覆岩体自重施加垂直荷载。TBM 开挖直径与实际工程一致,取 4 m。在模型的底面加固定约束,在侧面施加滑动约束。

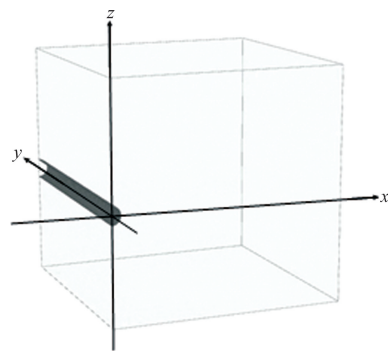


图 2 三维模型

2.2 模型参数确定

围岩的本构关系采用 Mohr-Coulomb 理想弹塑性模型,分别建立 V 类围岩和 II 类围岩模型,模拟 TBM 掘进遇到的不良地质地段和正常段围岩,物理力学参数如表 1 所示,参数主要依据工勘报告。

3 数值计算

3.1 围岩塑性破坏分析

为研究 TBM 施工对围岩的破坏机理,以 V 级围岩和 II 级围岩的模型作为对比模型,将初始开挖位置设置在模型中间,并计算 10 个循环开挖步,得到 V 级围岩和 II 级围岩的塑性破坏情况分别如图 4 和图 5 所示。

图 4 显示,在 V 级围岩且无支护的情况下,几乎整个巷道断面的围岩均出现剪切破坏点,当巷道开挖时,围岩的应力平衡被破坏,应力重分布导致巷道周围一定范围内的围岩应力达到极限平衡状态,形成塑性区。在撑靴支撑力作用下,支撑位置处的围岩顶部和底部均出现拉伸破坏点,当 TBM 逐步前进时,随着撑靴的不断加载,拉伸破坏点将逐渐沿巷道掘进方向向前发展,巷道顶板拉伸破坏点逐渐扩展,形成大面积的松散岩块并因重力掉落下来,最终导致围岩顶板垮塌现象(图 1)。

图 5 显示,II 级围岩因完整性好、强度高,巷道开挖后并未出现塑性破坏点,仅在撑靴支撑力作用下出现少量剪切破坏点。以上情况与实际工程 TBM 施工时的现象一致,一定程度上验证了模型的正确性。

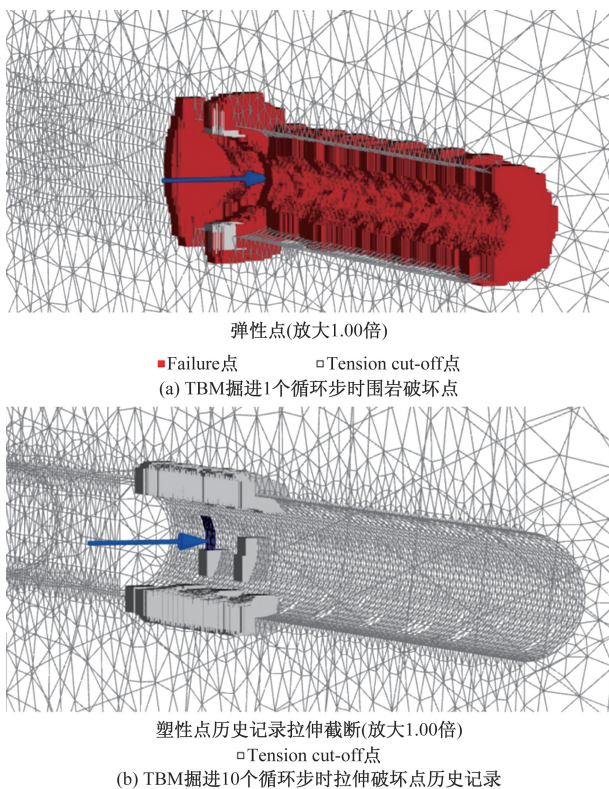


图 4 V 级围岩破坏情况

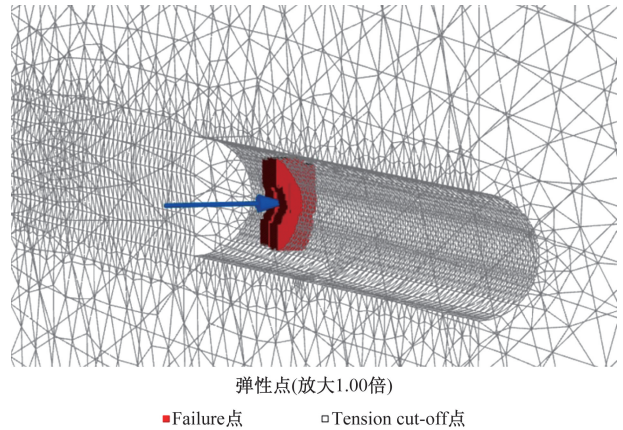


图 5 II 级围岩破坏情况

3.2 支护方案优化研究

3.2.1 围岩拉伸破坏区

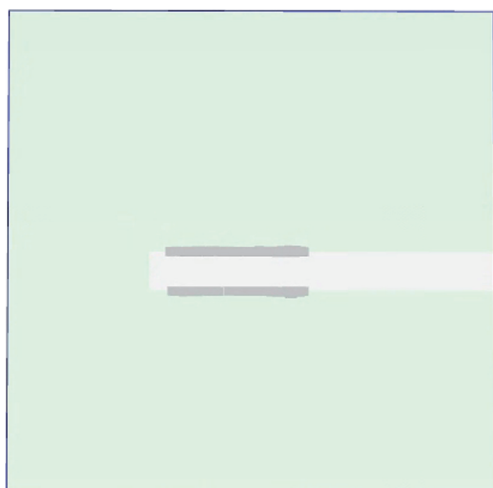
TBM 施工 10 个循环掘进步后,不同支护工况下巷道围岩的拉伸破坏历史记录点如图 6 所示(截面为巷道轴线位置处的竖向截面)。

从图 6 中可以看出,锚网喷支护时,围岩拉伸破坏点比无支护时有所减少,但顶板处仍有较大范围的拉伸破坏点,这是由于撑靴水平力引起的拉伸破坏主要发生在撑靴位置的围岩,而锚网喷受到 TBM 设备的限制,需要滞后于撑靴一定距离,无法对围岩拉伸破坏的发生位置进行有效保护。图 7 展示了锚网喷支护在实际工程中的施工过程,可以看出,锚网喷支护对围岩松散掉落的岩体起到有效的约束作用,可以有效防止掉落岩块对施工人员和设备的威胁。然而,锚网喷支护因滞后于撑靴安装,并不能完全控制顶板的拉伸破坏。当采用超前注浆加固+锚网喷联合支护方案时,围岩不再出现拉伸破坏点,说明注浆加固围岩的方式可以起到保护围岩稳定的作用。

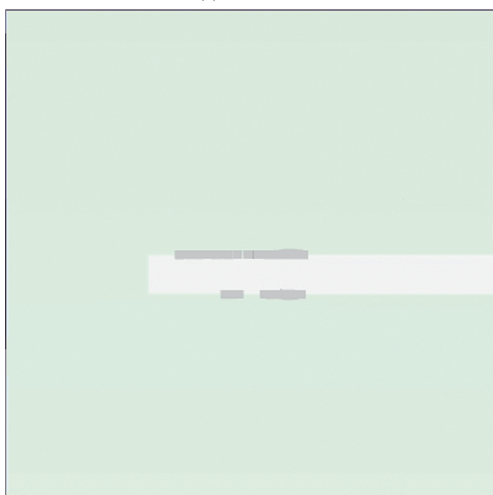
3.2.2 围岩变形分析

为研究支护形式对围岩的影响,分别计算锚网喷支护和“超前注浆+锚网喷”支护下的 V 级围岩数值模型,并与无支护模型计算结果对比,得到巷道顶板处的位移随 TBM 掘进的变化规律如图 8 所示,图中掘进步 1 代表被测点位于开挖面前方一个掘进步距的位置,掘进步 5 代表 TBM 撑靴到达被测点位置,掘进步 11 代表锚网喷支护环到达被测点位置。

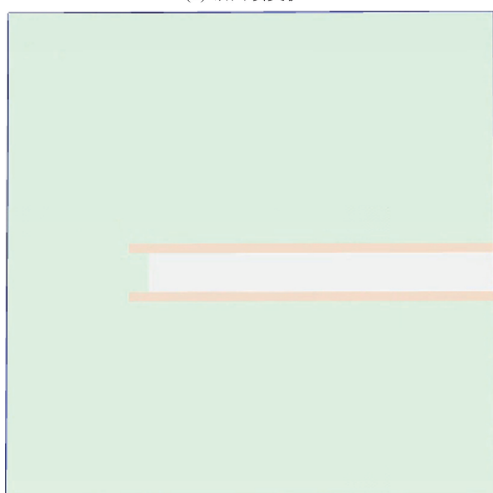
图 8 显示,三种支护工况下围岩变形随掘进步的变化规律类似,随着 TBM 撑靴靠近,围岩变形达到峰值,TBM 继续前进后围岩变形略减小并趋于稳定。



塑性点历史记录拉伸截断(放大1.00倍)
□ Tension cut-off点
(a) 无支护



塑性点历史记录拉伸截断(放大1.00倍)
□ Tension cut-off点
(b) 锚网喷支护



塑性点历史记录拉伸截断(放大1.00倍)
□ Tension cut-off点
(c) 超前注浆+锚网喷支护

图 6 不同支护工况下围岩破坏情况



图 7 锚网喷支护的施工现场

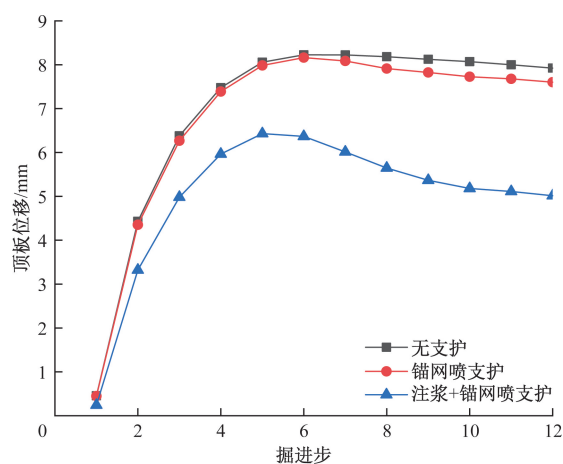


图 8 不同支护工况下顶板位移随掘进变化曲线

由于锚网喷支护的滞后性,其对围岩变形控制的作用较小,围岩顶板最大变形量为 8.163 mm,比无支护工况减小了 0.77%,最终变形量 7.603 mm,比无支护工况减小了 4.04%。而超前注浆支护效果显著,围岩顶板最大变形量为 6.43 mm,比无支护工况下的最大变形量减小了 21.83%,最终变形量为 5.014 mm,减小 36.72%。

4 结论与建议

针对江西某金属矿山 TBM 法施工在穿越不良地质时出现大块岩石掉落现象,本文通过数值模拟研究围岩稳定性,得出以下结论。

(1) TBM 施工时,撑靴的水平支撑力传递到巷道顶板会产生拉应力,在围岩质量较差的情况下,易发生拉伸破坏,随着 TBM 的前进,拉伸破坏塑性区逐渐发展,形成大面积的松散岩块,并因重力作用掉落,导致围岩顶板垮塌现象。

(2) 采用注浆加固方案后,围岩不再发生拉伸

破坏点,且围岩变形得到有效的控制,巷道顶板的最大变形量减小了 21.83%,最终变形量减小了 36.72%。相比之下,单独采用锚网喷单独支护的效果有限,但锚网喷支护能够有效地限制后期围岩变形的自由发展,并防止岩体松散掉落。

建议在类似金属矿山巷道 TBM 穿越不良地质地段时,采用提前注浆加固和锚网喷联合支护方案,以提高工程施工安全性和效率。

参考文献

- [1] 耿轶君,肖晴侠,孙兴邦,等. 兰州水源地双护盾 TBM 综合超前地质预报技术与应用[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(28): 12316-12324.
- [2] 杨耀红,韩兴忠,张智晓,等. 复合地层小直径隧道掘进机掘进速度区间预测[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(34): 14638-14650.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 孙扬,刘文学,牟林,等. 金属矿山斜坡道应用 TBM 施工的可行性探讨[J]. 中国矿山工程, 2021, 50(2): 1-5.
- [6] 陈发兴,蔡光辉,胡韬. 浅谈 TBM 在金属矿山的应用[J]. 有色金属设计, 2021, 48(2): 1-8.
- [7] 黄建鑫. TBM 在某金属矿山长距离井巷掘进中的应用[J]. 现代矿业, 2023, 39(7): 205-209.
- [8] 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.
- [9] 郭小勇,赵登锋. 中国十五冶: 行业首台矿用 TBM 助力智能绿色施工[J]. 中国有色金属, 2024(5): 23-28.
- [10] 方星桦,姚捷,徐震,等. 层状粉砂质泥岩地层 TBM 隧道围岩稳定性与支护方法研究[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(S2): 320-328.
- [11] 任汀,张海龙,郭远臣,等. TBM 施工隧道围岩变形计算及地表沉降控制[J]. 地下空间与工程学报, 2022, 18(S1): 412-417.
- [12] 王飞阳,周凯歌,方勇,等. TBM 开挖深埋铁路隧道引起的围岩扰动分析[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(2): 240-247.
- [13] 周振梁,谭忠盛,李林峰,等. TBM 隧道围岩-支护动态相互作用机制研究[J/OL]. 铁道科学与工程学报, 1-12 [2024-07-17]. <https://doi.org/10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20240434>.
- [14] 关宝树. 隧道工程设计要点集[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.
- [15] 钟桂彤. 铁路隧道[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1993.
- [16] 郑婕. TBM 掘进撑靴洞壁岩体破坏模式的数值模拟与分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
- [17] 杨腾添,李恒,周冠南,等. 软弱地层敞开放式 TBM 超前注浆加固技术研究[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(5): 858-864.

Research on the Stability of Surrounding Rock in TBM Tunneling of Metal Mine Roadways under Adverse Geological Conditions

ZHANG Chunhu¹, ZHOU Shaobing², LIU Rongle¹, SUN Zhihao³,
LI Mingrui¹, FAN Shuheng⁴, ZHOU Xinqing¹

(1. China Nerin Engineering Co. Ltd., Nanchang 330038, China; 2. Jiangxi Copper Co. Ltd., Nanchang 330038, China;

3. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

4. China Railway Engineering Equipment Group Co. Ltd., Zhengzhou 450016, China)

Abstract: Addressing the issue of large rock block detachment during TBM (Tunnel Boring Machine) construction in unfavorable geological conditions at a metal mine in Jiangxi Province, China, the horizontal thrust force of the gripper shoes was systematically analyzed for the first time to reveal its mechanism of inducing tensile failure in surrounding rock, based on the PLAXIS 3D finite element simulation platform and field observations. An optimized support scheme combining “pre-grouting reinforcement and rock bolt-mesh-shotcrete support” was proposed. The study reveals that during TBM construction in Class V rock mass conditions, tensile failure zones develop on the tunnel roof and progressively expand as the TBM advanced, leading to roof collapse phenomena observed in the project. The support optimization analysis compared three scenarios, such as no support, “rock bolt+mesh+shotcrete” (referred to as bolt-mesh-shotcrete support), and “pre-grouting reinforcement+bolt-mesh-shotcrete support.” Results show that the pre-grouting reinforcement scheme significantly enhances the stability of the surrounding rock, reducing the maximum roof deformation by 21.83% and the final deformation by 36.72%. While bolt-mesh-shotcrete support alone has limited effectiveness, it effectively restrains further deformation of the surrounding rock and prevents the detachment of loose rock masses. It is recommended that in similar TBM tunnel construction scenarios in metal mines encountering unfavorable geological conditions, the combined use of pre-grouting reinforcement and bolt-mesh-shotcrete support should be adopted to improve construction safety and efficiency.

Keywords: metal mine roadway; TBM; numerical simulation; adverse geological conditions; surrounding rock stability