富水软岩缓倾长斜井敞开式TBM掘进研究*

李安云

(中铁十五局集团有限公司, 上海 200040)

摘要:现有隧道掘进机(TBM)施工的隧道围岩多以硬岩为主,富水软岩隧道敞开式TBM施工是工程难题。针对某矿井工程富水软岩的困难地质条件,利用数值模拟与现场施工监测数据,分别从地质条件适应性、软弱破碎砂岩撑靴撑进、富水破碎砂岩水致软化等方面分析了敞开式TBM在典型富水破碎软岩地层施工的可行性,并提出分级支护措施。现场监测结果表明,采用敞开式TBM掘进,分级支护后顶板最大变形由9.2 cm降低至4.5 cm,变形程度降低了51.1%,有效保证了巷道围岩的安全稳定。同时基于现场调研对施工成本及工期进行了对比分析,进一步验证了采用敞开式TBM施工的可行性。最终施工结果表明,某工程项目历时396 d安全顺利完成掘进任务,日最高进尺31.53 m,月最高进尺521.53 m,比计划工期提前6个月完成掘进任务,具有良好的经济效益和社会效益。

关键词:富水软岩;缓倾长斜井;敞开式TBM;分级支护;数值模拟

中图分类号:TD263.2 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2025)04-0078-10

Research on Open-Type TBM Excavation of Gently-Inclined and Long Inclined Shaft in Water-Rich Soft Rock

LI Anyun

(China Railway 15th Bureau Group Co., Ltd., Shanghai 200040, China)

Abstract: The existing tunnel boring machines (TBM) construct tunnel surrounding rock is mainly for hard rock, and the open-type TBM construction of water-rich soft rock tunnel is an engineering problem. In view of the difficult geological conditions of water-rich soft rock in a mine project, the feasibility of open-type TBM construction in typical water-rich broken soft rock strata was analyzed from the aspects of geological condition adaptability, advancement by supporting shoes in soft and broken sandstone, and water-induced softening of water-rich broken sandstone using numerical simulation and field construction monitoring data. Graded support measures were put forward. The field monitoring results show that after using an open-type TBM for excavation and graded support, the maximum deformation of the roof is reduced from 9.2 cm to 4.5 cm, and the deformation degree is reduced by 51.5%, which effectively ensures the safety and stability of the surrounding rock of the roadway. At the same time, based on the field investigation, the construction cost and construction period were compared and analyzed, which further verified the feasibility of using open-type TBM construction. The final construction results show that the project takes 396 days to safely and successfully complete the excavation task. The maximum daily excavation is 31.53 m, and the maximum monthly excavation is 521.53 m. The excavation task is completed 6 months ahead of the planned construction period, which has good economic and social benefits.

Key words: Water-rich soft rock, Gently-inclined and long inclined shaft, Open-type TBM, Graded support, Numerical simulation

0 引言

隧道掘进机(TBM)作为先进的隧道施工设备之一,广泛应用于路网建设、市政建设、矿山开采和水利水电等领域,具有传统钻孔爆破方法无法比拟的安全、环保、高效、施工质量高等优点[1-3]。

TBM隧道施工技术已经日益成熟,但在矿井中采用敞开式TBM施工的案例几乎没有,这是因为与隧道工程不同,TBM在穿越矿井过程中会经历多种岩性变化[4-5],但是TBM对不同地层的适应性不同,尤其在富水软岩的不良地质条件下很难保证其安全稳定的掘进。

德国于1971年首先在矿井中引入了TBM,随后TBM在采矿领域得到广泛应用,应用高峰期发

* **收稿日期**:2024-06-19

作者简介:李安云(1979—),男,安徽淮北人,高级工程师,主要从事地下工程施工工作。E-mail:anyunli@163.com

生在 20 世纪 70 年代,当时进行了 10 余个 TBM 项目,以检验 TBM 应用于采矿工程的可行性。截至目前,在全球约 60 个矿山中,约 100 台掘进机已经挖掘了超过 220 km 的隧道[6-8]。

对国内已经使用 TBM 进行巷道施工的工程进行梳理,统计其开工时间、地层岩性、巷道设计参数及 TBM 设备类型及直径,具体案例见表 1。国内最早于 2003 年采用 TBM 进行大同塔山煤矿主平硐的掘进,该 TBM 设备由美国生产,随后 TBM 矿井工程案例并不多,直至 2012 年迎来快速发展,这也对应于 2010 年以后我国 TBM 行业基本实现自主研发与制造[9]。

从矿产类型来看,最近十年国内已有多个煤矿巷道采用 TBM 掘进,而金属矿山采用 TBM 掘进较晚[10],仅近几年湖南锂矿采选冶等项目开始采用 TBM 施工,且在采用 TBM 后,其工期均得到明显缩短。目前国家对于金属和能源矿产的需求不断增大,TBM 施工可有效缩短开挖时间,降低成本,这种施工方式将会成为未来金属矿山施工巷道工程的主流趋势[11-12]。

表 1 国内 TBM 施工工程案例

Table 1 TBM construction engineering cases in China

开工时间/年	施工工程	地层岩性	巷道参数		TBM 类型及直径	
			长度/m	坡度/(°)	类型	直径/m
2024	湖南锂矿采选冶项目	砂岩、灰岩	7 300.0	0	敞开式	6.30
2022	西鞍山斜井铁矿项目	花岗岩	4 230.0	12	敞开式	7.03
2003	大同塔山煤矿主平硐[13]	石灰岩、花岗岩	2 911.6	0	双护盾	4.83
2010	广西桂中治旱工程输水隧洞	灰岩、石灰岩	1 610.0	0	敞开式	5.94
2012	新疆涝坝湾煤矿副平硐工程[14]	粉砂岩	5 318.0	0	复合式	6.43
2014	南疆铁路中天山铁路隧道	砂岩、花岗岩	13 515.0	11	敞开式	8.80
2013—2015	神华新街台格庙矿区试验斜井[15],神东补连塔煤矿 2 号斜井[16]	砂岩、泥岩	6 553.0 2 733.0	6 6	双模单护盾	7.62
2019	山东新巨龙煤矿-980 m 水平巷道[17]	砂岩、灰岩	2 816.0	6	敞开式	6.34
2019	山西新景煤矿保安沟 8# 煤区水平南回风巷[18]	砂岩、灰岩	3 724.0	0	敞开式	4.54
2021	云南聚鑫煤+1 095 m 水平运输大巷[19]	砂岩、泥岩	2 126.8	0	护盾式	6.04
2021	陕西榆林可可盖副斜井[20]	砂岩、泥岩	5 302.0	6	敞开式	7.13

从地层岩性来看,主要地层均为沉积岩地层(砂岩、灰岩与泥岩),存在强度低、岩性软等问题,岩石强度多为 10～60 MPa,且受风化、地下水渗流等不良作用,强度劣化问题严重。

从巷道设计参数来看,巷道平均长度为 4 053.8 m,考虑掘进距离过短采用 TBM 掘进的成本会偏高。巷道设计有平硐和斜井两种,近年来斜井建设数量增多,坡度一般为 6°下坡。

从 TBM 类型及直径来看,矿井巷道 TBM 掘进主要采用敞开式 TBM、护盾式 TBM 和双模 TBM 三种,平均直径为 6.12 m。其中神华集团新街台格庙矿井和神东补连塔矿井首次采用双模 TBM 掘进,既有单盾构 TBM 模型,也有土压平衡(EPB)模型,可以快速切换,在软土地基中掘进采用 EPB 模型,在硬或中硬土地基中掘进应采用 TBM 模型。

本研究以某矿井为例,利用数值模拟分析敞开式 TBM 在富水软岩斜井掘进过程中的撑靴受力及破碎砂岩水致软化等问题,结合现场调研,提出相应支护措施,并验证施工方案在时间和经济上的可行性,以期缩短工期,为敞开式 TBM 在富水软岩斜井中的施工提供参考。

1 工程背景

1.1 工程概况

本工程矿井建设规模 1 000 万 t/a,服务年限 85.4 a。斜井长 5 206.5 m,明槽段 271.6 m,TBM 段 4 934.9 m,6°下坡施工,井筒开挖直径 7 130 mm。

根据井田勘探报告和斜井检查孔资料,矿井地表全部被第四系松散沉积物覆盖,主要有全新统风积沙,上更新统萨拉乌苏组,中、下更新统黄土。钻孔揭露的地层自上而下为白垩系下统洛河组,侏罗系中统安定组、直罗组、延安组地层,矿区地层条件如图 1 所示。

1.2 工程难点

(1) 软弱围岩变形过大。西部白垩系、侏罗系砂岩属软岩,其强度低、易风化,水敏性强、遇水软化,存在泥质胶结,在本工程主副斜井 TBM 掘进的前 80 m,已有的最深冒落尺寸约为 3 m,并进而形成区域大面积冒落的危险破坏。另外,敞开式 TBM 需要通过撑靴支撑前进,存在软弱围岩不能提供足够撑靴支撑力的问题。

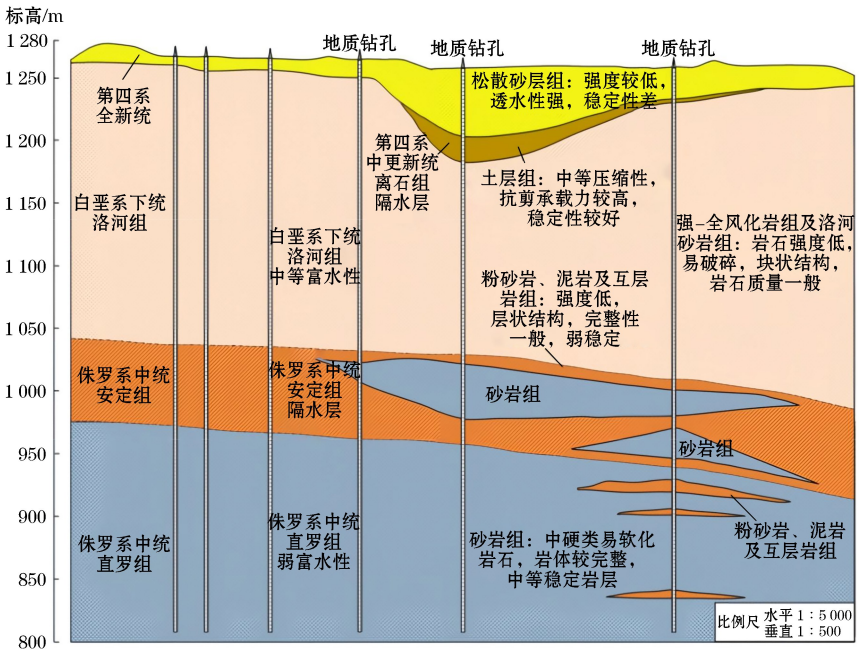


图 1 矿区地层条件

Fig.1 Stratigraphic conditions of mining area

(2) 破碎围岩支护困难。深部岩体受多种复杂的地质构造作用,存在大量的断层、节理和裂隙等结构面。在节理破碎岩体中,隧道的失稳破坏往往是由岩块沿节理面的剪切滑移造成的,但目前的研究难以模拟支护结构与破碎围压结构面相互作用的真实情况。同时采用敞开式 TBM 在洛河组长石砂岩地层施工时,由于施加锚杆后到喷浆作业间有 80～100 m 间距,易引发围岩大范围掉块、坍塌。

(3) 富水围岩水致软化。本工程主副斜井场址涌水量为 181～2 788 m^3/d,富水性中等至强,隧道埋深达 520 m,水头压力极大,极易形成高水压作业环境。进水不仅削弱了岩体强度,还降低了锚杆和锚索的黏结强度,降低支护有效性。此外,若开挖引起的裂缝与顶板含水层相连,则可能发生突水破坏。

2 斜井 TBM 选型因素分析

从 TBM 类型及直径来看,矿井巷道 TBM 掘进主要采用敞开式 TBM、护盾式 TBM 和双模 TBM 三种。鉴于本工程斜井施工所面临的复杂地质环境,如软岩破碎、大变形等,为了确保施工质量,有必要对各种类型的 TBM 进行比较分析,以确定适合该斜井施工条件的掘进方案。

2.1 地质条件适应性分析

当穿越地质复杂的岩体时,无论是敞开式 TMB 还是护盾式 TBM,均存在被卡住或者被困的风险。另外,由于护盾式 TBM 的盾体较长,卡住的可能性也较大,因此其脱困的难度也更大。敞开式 TBM 具有较短的盾壳,可以很好地适应坡度,从而降低卡机的风险。敞开式 TBM 具有较好的适应性和灵活性,可以有效地支撑恶劣岩层,满足掘进与支护之间的协同及时性的要求。此外,护盾式 TBM 的护盾结构是一个整体,由于刀盘的扩挖,护盾覆盖内会出现很大的空顶地区,从而降低顶部的保护功效。敞开式 TBM 护盾采用分体式设计,可以通过千斤顶的延伸功能,将上护盾和侧护盾分开安装在井筒顶部和侧帮,从而达到主动保护的目的,可以大幅缩小空顶距离。由于斜井深度达 520 m,井筒围岩均为软岩,双护盾如遇软岩大变形地段脱困处理难度较高。

2.2 软弱破碎砂岩撑靴撑进分析

洛河组的砂岩层厚度约为 257 m,表现为散体和碎裂的结构,属于较软的岩石类型。虽然岩心保持较为完整,但其易碎性导致岩石质量指数为 0～63%。这表明井壁围岩层稳定性差,施工中面临的主要问题包括斜井围岩承载力弱、变形严重、维持时间长、破坏程度高以及支护困难等。

在使用开敞式 TBM 施工时,需要井壁围岩有足够的强度和稳定性。然而,在本工程斜井施工过程中,在掘进至深度 180 m 处的洛河组富水地层时,遇到了严峻的挑战。因井壁岩石破碎,TBM 的

左撑靴施加的压力超过了围岩的整体抗压强度。这导致撑靴与岩石表面受力不均,撑靴处的围岩被压溃,形成了塌腔。由此引起的问题还包括左撑靴与油缸连接面的螺栓断裂脱落,导致撑靴无法有效撑紧,最终造成工地停工,无法继续掘进。

选取 180 m 埋深的典型断面,建立数值模型模拟斜井敞开式 TBM 穿越破碎岩层的破坏模式及加固支护,如图 2 所示。根据圣维南原则设置模型尺寸为 80 m×80 m,在模型左右侧和底面固定法向位移约束。根据施工现场情况在斜井开挖面帮部设置厚度为 3 m 的破碎砂岩夹层。

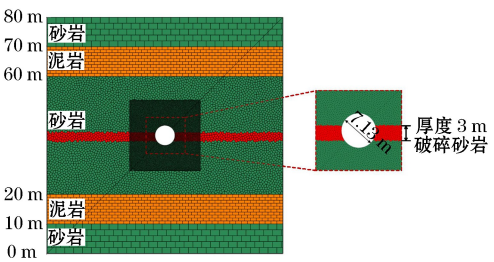
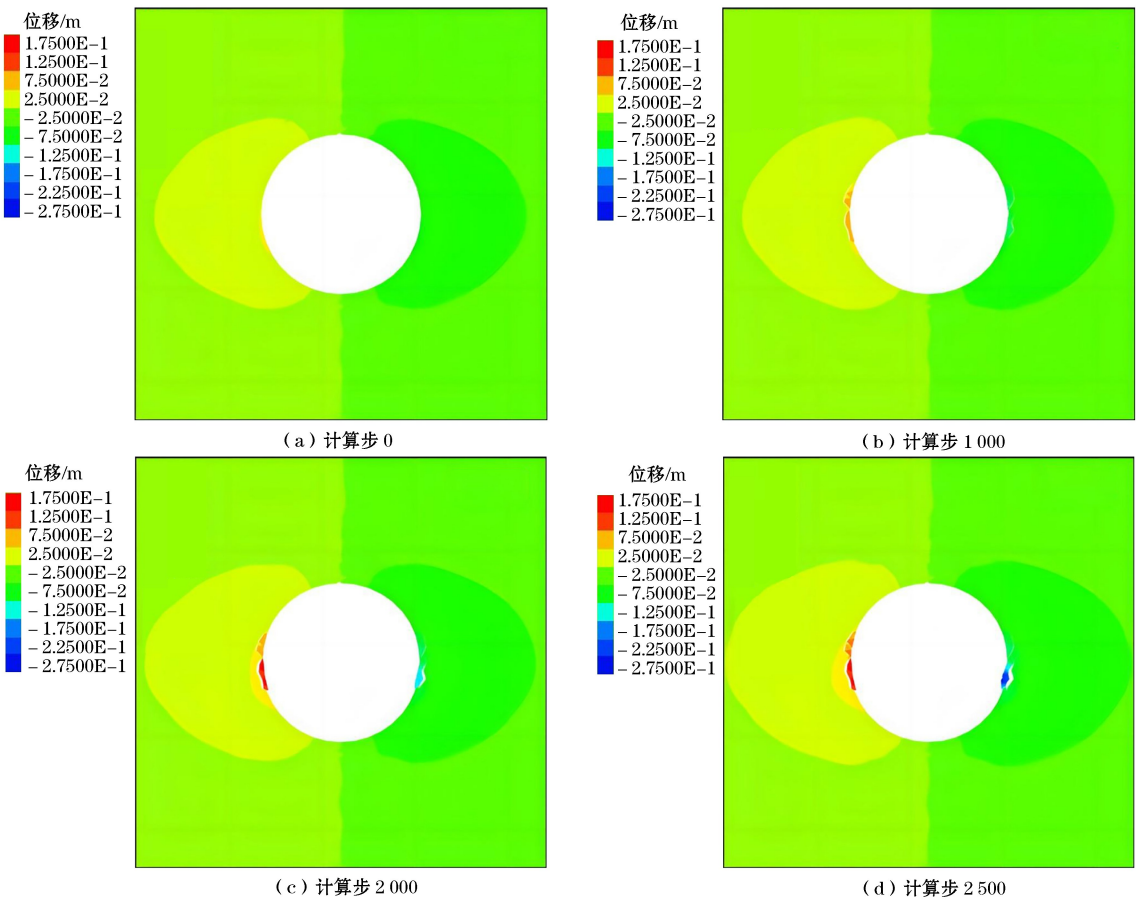


图 2 数值模型

Fig.2 Numerical model

在斜井掘进过程中,撑靴位于刀盘前约 20 m 的位置,基于开挖作业与应力释放的相互关系,设定开挖面的应力释放水平为 60%。此外,根据敞开式 TBM 控制室的 PLC 系统读数,左侧撑靴的压力为 2.7 MPa,右侧撑靴的压力为 2.4 MPa。因此,在模拟过程中,在开挖面的左右侧施加相应的压力,分别为2.7 MPa 和 2.4 MPa,以此反映撑靴对围岩施加的实际支撑力。在进行模拟时,通过每 500 个计算步的间隔来分析撑靴对围岩影响的进展,其中,计算步为 0 代表 TBM 掘进后围岩应力释放至 60%的初始状态。此模拟重点观察撑靴对破碎砂岩夹层水平变形的影响。

模拟结果如图 3 所示,在撑靴作用之前,水平变形相对较小,最大位移值达到了 5.24 cm,这一变形程度不足以影响后续的施工活动。然而,一旦撑靴施加压力至破碎砂岩夹层,便在隧道左右侧壁观察到了显著的层间剥落与破坏现象,最大水平位移激增至 27.5 cm,需要进行及时的施工处理以控制巷道围岩变形,保证撑靴正常受力并提供掘进所需反力,保持开挖面稳定掘进。



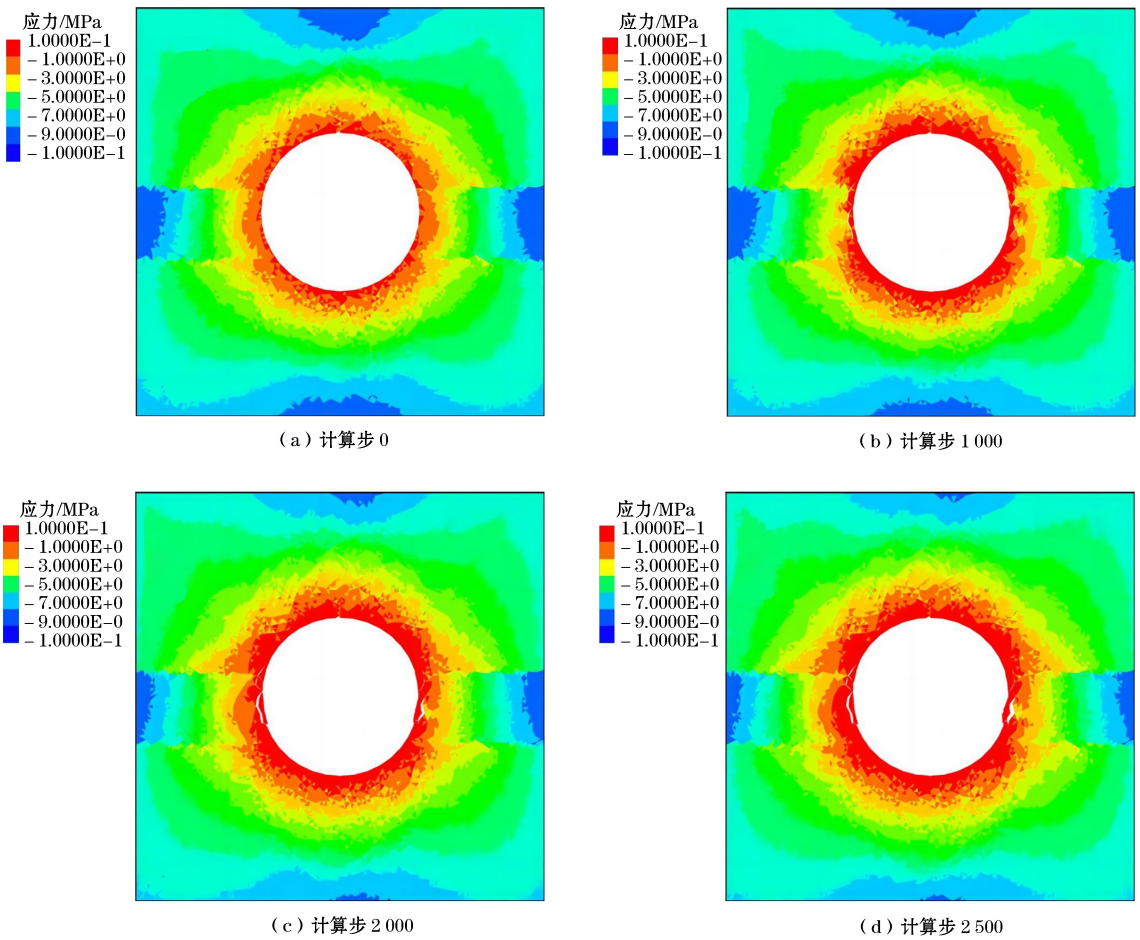
(a) 计算步 0　　(b) 计算步 1 000

(c) 计算步 2 000　　(d) 计算步 2 500

图 3 水平变形云图

Fig.3 Cloud maps of horizontal deformation

在分析撑靴对破碎砂岩夹层影响时所得到的最小主应力分布图(见图 4)中,可以观察到随着作用于巷道表面的边界力的逐渐释放,应力集中区域不断扩散并向巷道外移动。存在于夹层与砂岩接触面的破碎夹层也显示了不同程度的应力集中现象。在模拟的初始阶段(计算步 0),可以明显看到顶部和底部的应力集中程度超过了侧壁,这主要是由于洛河组地层受到构造应力的影响,使得水平方向的应力超过了竖直方向的应力。当撑靴开始受力,侧壁的应力迅速集中,并随之产生破坏。



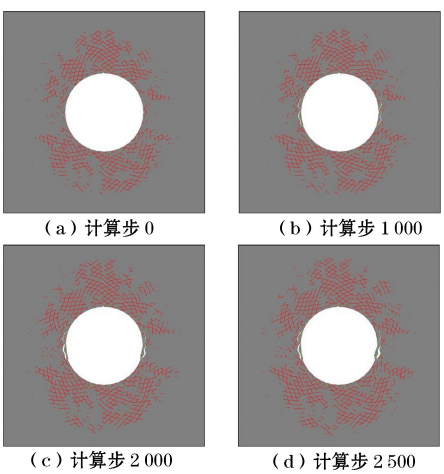
(a) 计算步 0　(b) 计算步 1 000

(c) 计算步 2 000　(d) 计算步 2 500

图 4　最小主应力云图

Fig.4　Cloud maps of minimum principal stress

撑靴作用于破碎砂岩夹层时的裂隙拓展情况见图 5 和表 2。巷道开挖后裂隙类型主要为剪切裂隙,这些裂隙从挖掘面开始向周围的岩石深处扩散。相比之下,顶板和底板的裂隙扩展深度明显大于左右侧壁,当没有撑靴支撑且应力释放至 60%时,在巷道的顶部区域观察到较少的拉剪裂缝。当撑靴被应用于破碎的围岩中,在巷道的左右侧壁出现了拉剪裂缝,并且这些裂缝在巷道表面及其浅层部位迅速扩展,导致围岩的进一步破碎。随着模拟步骤的继续,一方面,剪切裂隙在岩石内部迅速得到填补,而围岩深处的扩展仍在继续;另一方面,拉剪裂缝的扩展主要发生在撑靴作用区域的围岩左右侧壁的表层位置。



(a) 计算步 0　(b) 计算步 1 000

(c) 计算步 2 000　(d) 计算步 2 500

图 5　裂隙拓展情况

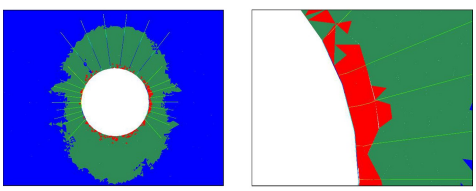
Fig.5　Expansion of cracks

表 2 裂隙数量及长度统计

Table 2 Statistics of number and length of cracks

计算步	拉伸裂隙		剪切裂隙	
	数量/条	长度/m	数量/条	长度/m
0	10	0.94	16 924	1 844.09
500	58	5.67	16 902	1 841.94
1 000	39	3.43	16 911	1 842.57
1 500	41	3.51	17 033	1 854.52
2 000	49	4.20	17 471	1 903.63
2 500	44	3.53	17 943	1 961.99

图 6 为塌腔处围岩加固支护数值模拟结果。在发生破碎现象的巷道围岩左右帮进行锚杆加密及紧急喷混及网片支护,可以看到加固措施可以有效控制破碎围岩帮部破碎塌腔情况,主导围岩破坏的拉剪塑性区面积范围大幅度缩小,表明加密锚杆布设长度可锚固至稳定基岩,可以起到控制内部裂隙发育的效果。对破碎巷道帮部的加固措施可以快速有效稳定围岩,为 TBM 撑靴提供足够的支撑力和掘进反力,但在已经产生压溃破坏的帮部岩层内部,裂隙拓展的情况仍然存在,内部裂隙是未来巷道围岩发生二次破坏的危险因素,因此后期施工对破碎岩层的注浆加固措施必不可少。



(a) 支护数值模拟 (b) 内部裂隙

图 6 支护数值模拟及内部裂隙

Fig.6 Numerical simulatiom of support and internal cracks

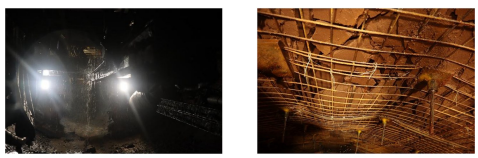
在井筒撑靴的前部区域出现了帮部较为破碎的情况,因此提前对这些破碎的岩面进行了加固处理。具体的施工步骤如下。

(1) 撑靴前部破碎。首先对破碎区域进行清理,并采用长度为 5.3 m 和 7.3 m 的锚索进行支护,确保预留足够的长度,然后按照规定的厚度安装多层网片,形成弧形的假帮;在破碎的假帮区域进行混凝土喷射,形成弧形的支撑面和支撑反力,为撑靴提供必要的支撑;待喷浆面硬化后,TBM 顺利通过。

(2) 撑靴部位破碎。退回或伸出撑靴,重复步骤(1),待 TBM 顺利通过该段后,对锚索进行二次张拉,降低锚索一次张拉锚固过程中和撑靴支撑后产生的锚固回缩量,提升对破碎砂岩的锚固效果。考虑到围岩破碎程度大,撑靴受力面趋于稳定时对破碎区域进行注浆加固,增强围岩内部强度。

2.3 富水破碎砂岩水致软化分析

本工程斜井掘砌项目下穿有含水层:洛河组(富水性中等至强)和直罗组(富水性弱),掘进后出现顶板冒水、岩石软化的不良问题(见图 7,颜色标识见电子版)。如图 7(b)所示为白垩系洛河组砂岩,为紫红色、砖黄色块状长石砂岩,胶结作用明显,巷道内部结构疏松,发育有巨型楔状交错层理,岩体破碎,遇水软化后极易崩解,置于手心可直接碾碎,对巷道围岩稳定提出更高要求。



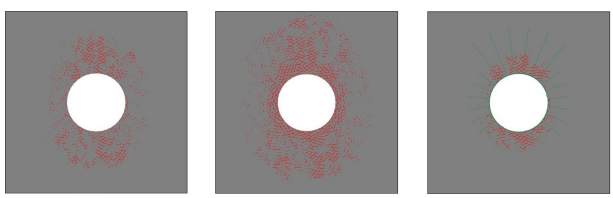
(a) 顶板突水 (b) 软化砂岩

图 7 富水地层工程问题

Fig.7 Engineering problems in water-rich strata

开挖面处纵向变形最大值不超过隧道径向变形最终值的 30%。考虑 TBM 通过开挖面后导水通道即形成,围岩性质开始劣化,在应力释放至 30%时降低距离围岩开挖面厚度 1 m 处的岩体参数,以模拟富水破碎砂岩的水致软化过程。

模拟结果如图 8 所示。相较于岩石未劣化情况,水致软化后围岩性质快速劣化,巷道周围裂隙成为导水通道,进一步扩大围岩深部破碎范围,最终破碎区深度 6.2 m,较未劣化情况增加 2.1 m。



(a) 岩石未劣化 (b) 水致软化 (c) 注浆后

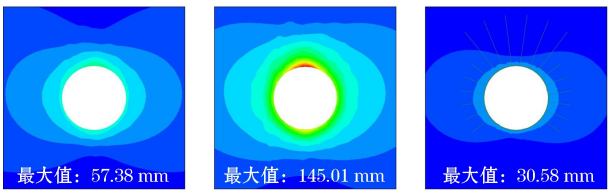
图 8 围岩裂隙拓展情况

Fig.8 Expansion of surrounding rock cracks

孟庆彬等[21]提出了使用应力释放率作为决定进行注浆操作的关键指标,并认为当应力释放率达到 60%时,便是进行注浆的合适时机。据此,模拟假设在应力释放到 60%时进行注浆操作,以此增强岩石的性能参数,通过编程语言 Fish 实现此过程。模拟结果如图 9 所示,注浆前后的围岩变形情况存在显著差异。

具体来说,在水致软化作用下的砂岩,注浆前的最大变形达到了 145.01 mm。经过支护并进行注浆处理后,变形被有效控制在 30.58 mm,变形程度降

低了 78.9%。此外,模拟还揭示了注浆能够有效阻止裂隙的进一步扩展。在对富水破碎围岩进行注浆后,裂隙和破碎区域被限制在 1 m 范围内。这表明,通过注浆封闭岩石裂面是一种有效的控制富水破碎围岩变形的方式。



(a) 岩石未劣化 (b) 水致软化 (c) 注浆后

图 9 围岩总位移云图

Fig.9 Cloud maps of total displacement of surrounding rock

为防治洛河组岩层富水这一安全风险,施工单位通过深入研究分析洛河组岩层涌水特点,总结其特点为通过孔隙渗水、瞬时水量较小。采用"多级排水、分段截水、及时喷浆封闭巷道"方法,保障敞开式 TBM 顺利通过富水岩层。

2.4 支护施工技术分析

针对富水复杂多类岩层破坏现象,本工程斜井敞开式 TBM 项目采用分级支护方式进行支护(见表 3),以有效缓解隧道掘进支护压力。

表 3 支护等级与支护措施

Table 3 Support levels and support measures

支护等级	支护措施
一级	锚杆:排距 900 mm×900 mm,布设 2.4 m×18。
二级	锚杆:排距 900 mm×900 mm,布设 2.8 m×6、2.4 m×12。
三级	锚杆:排距 900 mm×900 mm,布设 2.8 m×4、2.4 m×8。 锚索:排距 1 800 mm×1 800 mm,布设 5.3 m×6。
四级	锚杆:排距 900 mm×900 mm,布设 2.8 m×4、2.4 m×8。 锚索:排距 1 800 mm×1 800 mm,布设 7.3 m×3、5.3 m×3。

根据现场经验与数值模拟可知,斜井向下穿越地层,随着埋深的增加,水平构造应力增大,同时地层岩性也随之变化,支护方案需要综合考虑岩性与应力的影响。以本工程为例,根据地质钻孔勘查结果,地层自上而下主要为第四系全新统风积沙、上更新统萨拉乌苏组、第四系中下更新统黄土、白垩系下统洛河组、侏罗系中统安定组、侏罗系中统直罗组、侏罗系中统延安组地层,地层岩性越发良好。同时根据水压致裂法测得地应力情况,所测范围(6 号钻孔,最深至 450 m)最大水平主应力为 10.95~19.37 MPa,最小水平主应力为 7.91~13.23 MPa,应力与埋深拟合满足不同埋深处地应力拟合关系。综合现场经验与数值结果,针对斜井正常掘进区域与危险冒落区域,设置不同应力及岩性情况下支护方案,支护等级判断标准见表 4。

表 4 支护等级判断标准

Table 4 Criteria for judging of support levels

围岩等级	水平应力状态/MPa			
	<5	5~10	10~20	>20
Ⅲ	一级	一级	一级	二级
Ⅳ	一级	一级	二级	三级
Ⅴ	一级	二级	三级	四级

根据分级支护优化方案进行现场施工,在 TBM 通过掌子面后快速支护,地质条件良好、正常掘进区域采用"锚网索"支护,同时对冒落危险区域进行"锚网索+W 型钢带"加强支护,具体支护施工操作如图 10 所示,最后再进行喷射混凝土施工,达到封闭围岩控制变形的效果。从围岩控制效果情况来看,现场施工采用分级支护优化方案后,围岩变形及支护破坏现象得到有效控制,现场监测到顶板最大变形由 9.2 cm 降低至 4.5 cm,变形程度降低了 51.1%,巷道围岩开裂、拱顶冒落等施工问题得到有效解决,同时大大降低了支护结构的经济成本,该支护方案可为类似工程问题提供参考[22]。



(a) 钢筋网+锚杆



(b) 钢筋网+锚杆/锚索+W 型钢带

图 10 支护方案现场应用

Fig.10 Field application of the support scheme

2.5 投资成本与工期分析

具体工期及投资对比见表 5。由表 5 可知,采用敞开式 TBM 方案施工在工期落后不多的情况下

可以明显降低施工成本,具有良好的经济效益。

表 5 工期与投资对比

Table 5 Comparison of construction period and investment

方案	工期/月	投资估算/万元	技术经济指标/(万元/单延长米)
普通法+敞开式 TBM	21	57 399.81	5.41
单护盾 TBM 加装撑靴	19	60 758.72	5.73
单护盾双模 TBM	20	67 690.86	6.38

2.6 选型结果

根据地方测量资料,白垩系洛河组土壤岩体的饱和单轴抗压能力为 0 MPa,因此敞开式 TBM 在本项目中的使用受到了一定限制,因为其需要围岩具有一定的抗压强度,以便提供一定的反力,从而使得敞开式 TBM 在理论上存在施工局限性,因此需进一步探讨使用敞开式 TBM 施工的可行性。

通过在洛河组岩层上开展锚固作用、围岩力度和支撑性能试验。结果显示,锚索拉拔力到达 100 kN 以上,远超过矿井巷道支护锚杆锚固力的要求,而且锚杆托盘与岩体紧紧贴合,未出现松动情况。此外,在模拟撑靴与围岩相互作用时,即使围岩受压超过 33 MPa,也未出现溃散、崩裂等破坏现象。

理论分析和实地测试结果表明,洛河组地层围岩具有良好的自稳性,因此,通过增加撑靴面积,合理进行支护,可以满足敞开式 TBM 撑靴的稳定性要求,从而提高施工效率。同时在综合考虑成本和工期的情况下,敞开式 TBM 优势明显,在岩性较好地层快速进行锚网喷支护及掘进,可大大提高施工效率,且锚网喷支护较管片支护经济实惠。因此本研究认为选择敞开式 TBM 方案最优,能够较好完成工程施工任务。

3 施工效果分析

从应用情况来看,本工程斜井采用敞开式 TBM 掘进不仅大幅度提高功效、节约成本,还保证了斜井围岩的稳定性,实现了安全、高效掘进目标,项目历时 396 d 安全顺利完成掘进任务,日最高进尺 31.53 m,月最高进尺 521.53 m,比计划工期提前 6 个月完成掘进任务,具有良好的经济效益和社会效益。

3.1 经济效益

相较于传统钻爆法与冻结法施工,斜井敞开式 TBM 掘进技术实现了机械化一次性全断面破岩、主要施工及支护工序自动化作业,井下作业人员数量较传统方法减少约 40%,且掘进效率相比传统综掘法、钻爆法分别提高了 3 倍和 5 倍以上。相较于管片支护和砌碹支护,锚网喷支护施工简单,成本低廉,在达到安全支护的前提下可降低工程造价。相较于传统巷道锚网喷支护,采用分级支护方案可实现高效支护,进一步节约成本。

参照国内有关煤炭行业井巷工程类似工程指标,并按本工程所在省有关收费标准及相应定额,结合工程具体情况,分析估算支护费用,见表 6。相较于管片支护,锚网支护可节约 5 145.8 万元,采用分级支护方案施工,可进一步节约 1 008 万元。

表 6 支护费用估算

Table 6 Estimation of support costs

支护方式	技术经济指标/(万元/单延长米)	工程费用/万元
管片支护	6.38	33 845.9
锚网支护	5.41	28 700.1
分级支护	5.22	27 692.1

3.2 环保效益

相较于传统的钻爆法及冻结法建井,敞开式 TBM 斜井掘进及锚网喷支护可大幅缩短工期,降低材料资源投入及机械设备投入,显著减少对周边环境的扰动及破坏。分级支护工法的使用可进一步减少支护材料的使用,合理高效支护掘进巷道,有明显的环保效益。

3.3 社会效益

本工程敞开式 TBM 斜井建井项目的成功应用,突破了我国智能化建井基础理论、技术装备和工程实践的技术壁垒,为我国西部地区破碎深埋软岩地层矿井建设工程提供了安全高效建井示范。

4 结论

(1) 针对富水软岩斜井 TBM 选型问题,探讨了影响选型的因素,通过对本工程斜井的地质条件适应性、撑靴撑进、水致软化及支护方式进行分析,确立了敞开式 TBM 在破碎围岩下施工的可行性,在综合考虑施工和投资成本的情况下,敞开式 TBM 掘进方案相较于其他方案,具有明显的优越性。

(2) 本工程使用敞开式 TBM 历时 396 d 安全顺利完成掘进任务,日最高进尺 31.53 m,月最高进尺 521.53 m,比计划工期提前 6 个月完成掘进任务,具有良好的经济效益、环保效益及社会效益。

(3) 本研究仅根据数值模拟和现场施工监测数据进行了分析,随着大数据和人工智能技术的发展,

后续研究应进一步通过深度学习方式完善该方法。

参考文献(References):

[1] 康红普.我国煤矿巷道围岩控制技术发展70年及展望[J].岩石力学与工程学报,2021,40(1):1-30.
KANG Hongpu. Seventy years development and prospects of strata control technologies for coalmine roadways in China [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021,40(1):1-30.

[2] 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.
SUN Yang, LIU Wenxue, MOU Lin, et al. Discussion on feasibility of applying TBM to construction slope in metal mine[J]. China Mine Engineering,2021,50(2):1-5.

[3] 何满潮.深部建井力学研究进展[J].煤炭学报,2021,46(3):726-746.
HE Manchao. Research progress of deep shaft construction mechanics[J]. Journal of China Coal Society,2021,46(3):726-746.

[4] 陈孝国,黄鸿辉,杨悦,等.长斜井煤矿TBM施工灾害风险预警模型[J].灾害学,2019,34(3):146-149.
CHEN Xiaoguo, HUANG Honghui, YANG Yue, et al. Disaster risk warning model of TBM construction in long inclined-shaft coalmine [J]. Journal of Catastrophology, 2019,34(3):146-149.

[5] 齐梦学.我国TBM法隧道工程技术的发展、现状及展望[J].隧道建设(中英文),2021,41(11):1964-1979.
QI Mengxue. Development, current status, and prospects of TBM tunneling technology in China [J]. Tunnel Construction,2021,41(11):1964-1979.

[6] 郑小钟,李虎军.大坡度长距离煤矿斜井TBM出渣设备选型技术[J].煤炭与化工,2017,40(8):88-91.
ZHENG Xiaozhong, LI Hujun. Selection technology of TBM slag discharge equipment in large slope long distance coal mine inclined shaft[J]. Coal and Chemical Industry, 2017,40(8):88-91.

[7] 汪青仓,刘全辉,宋朝阳,等.煤矿超长斜井敞开式全断面掘进机施工可行性分析[J].煤炭科学技术,2023,51(7):310-320.
WANG Qingcang, LIU Quanhui, SONG Chaoyang, et al. Feasibility analysis of excavation with open full section boring machine for ultra-long distance slant in coal mine[J]. Coal Science and Technologyy,2023,51(7):310-320.

[8] ZHENG Yanlong, ZHANG Qianbing, ZHAO Jian. Challenges and opportunities of using tunnel boring machines in mining[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2016,57:287-299.

[9] 荆留杰,张娜,杨晨.TBM及其施工技术在中国的发展与趋势[J].隧道建设,2016,36(3):331-337.
JING Liujie, ZHANG Na, YANG Chen. Development of TBM and its construction technologies in China[J]. Tunnel Construction,2016,36(3):331-337.

[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] 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 non-metal underground mines[J]. Mining Technology,2023,23(5):33-36.

[12] 张鹏,赵腾跃,李元龙,等.结泥条件下TBM滚刀破岩能量演化机制及掘进参数优化研究[J].矿业研究与开发,2024,44(5):201-210.
ZHANG Peng, ZHAO Tengyue, LI Yuanlong, et al. Research on the energy evolution mechanism in rock breaking and excavation parameter optimization of TBM cutters under the condition of argillization [J]. Mining Research and Development,2024,44(5):201-210.

[13] 高润平,刘文.隧道掘进机在塔山煤矿平硐施工中的应用[J].煤矿开采,2005(5):44-46.
GAO Runping, LIU Wen. Application of the tunneling machine in the construction of chamber in Tashan coal mine [J]. Coal Mining,2005(5):44-46.

[14] 杨皓博.软岩平硐TBM施工围岩稳定性控制研究[D].西安:西安科技大学,2018.
YANG Haobo. Study on stability control of surrounding rock during TBM excavation in soft-rock horizontal tunnel[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology,2018.

[15] 龙斌.新街台格庙矿区长距离大坡度斜井TBM设备选型探讨[J].铁道建筑技术,2012(10):25-27.
LONG Bin. Equipment selection and designation of TBM in long distance and large slope incline shaft of Xinjie Taigemiao Mine [J]. Railway Construction Technology,2012(10):25-27.

[16] 江玉生,刘颖超,刘波,等.补连塔煤矿不同深度岩石磨蚀性试验研究[J].煤炭科学技术,2017,45(11):81-87.
JIANG Yusheng, LIU Yingchao, LIU Bo, et al. Study on abrasion test of rock from different depth of Bulianta Coal Mine[J]. Coal Science and Technology,2017,45(11):81-87.

[17] 张洪伟,胡兆锋,程敬义.深部高温矿井大断面岩巷TBM智能掘进技术:以"新矿1号"TBM为例[J].煤炭学报,2021,46(7):2174-2185.
ZHANG Hongwei, HU Zhaofeng, CHENG Jingyi. TBM techniques for intelligent excavating large-section rock roadway in the deep high-temperature coal mines: application of TBM in Xinkuang No.1[J]. Journal of China Coal Society,2021,46(7):2174-2185.

[18] 程凯,王海凤.TBM型盾构机在新景公司保安分区8#煤回风巷的应用[J].山东煤炭科技,2020(5):123-125.
CHENG Kai, WANG Haifeng. Application of TBM-type shield machine in 8# coal return air lane in security zone of Xinjing Company [J]. Shandong Coal Science and Technology,2020(5):123-125.

[19] 代恩虎,王勇,鲁义强,等.云贵地区煤矿TBM施工技术应用研究[J].煤炭科学技术,2022,50(10):10-18.

DAI Enhu, WANG Yong, LU Yiqiang, et al. Study on application of TBM construction technology in coal mine in Yunnan-Guizhou area[J]. Coal Science and Technology, 2022,50(10):10-18.

[20] 范京道,封华,宋朝阳.可可盖煤矿全矿井机械破岩智能化建井关键技术与装备[J].煤炭学报,2022,47(1):499-514.
FAN Jingdao, FENG Hua, SONG Chaoyang. Key technology and equipment of intelligent mine construction of whole mine mechanical rock breaking in Kekegai Coal Mine [J]. Journal of China Coal Society,2022,47(1):499-514.

[21] 孟庆彬,韩立军,王琦.深部高应力软岩巷道注浆时机优化分析[J].中南大学学报(自然科学版),2017,48(10):2765-2776.
MENG Qingbin, HAN Lijun, WANG Qi. Optimization analysis of grouting timing in deep and high stress soft rock roadway[J]. Journal of Central South University (Science and Technology),2017,48(10):2765-2776.

[22] 李安云,张凯,徐金峰,等.破碎软岩斜井 TBM 开挖围岩稳定性及支护优化研究:以可可盖副斜井 TBM 掘进工程为例[J].隧道建设(中英文),2023,43(11):1924-1934.
LI Anyun, ZHANG Kai, XU Jinfeng, et al. Stability of surrounding rock and support optimization of a broken soft-rock-inclined shaft bored by tunnel boring machine: a case study of Kekegai sub-inclined shaft[J]. Tunnel Construction, 2023,43(11):1924-1934.