

# TBM法用于金属矿山深部开拓巷道的风险分析及应对措施

朱爱山<sup>1</sup>, 周慧鹏<sup>1</sup>, 李勇<sup>2</sup>

(1. 浙江省隧道工程集团有限公司, 浙江 杭州 310030; 2. 中铁工程装备集团有限公司, 河南 郑州 450016)

**摘要:**国内金属矿山深部采矿,采用钻爆法工程工期很长,不确定的各项风险较大。TBM法施工速度快、安全、质量好,在水利、市政、公路等运用已很广泛。“四新技术”的不断应用,设备的不断改进,国产TBM性能和质量不断提升,施工成本也大幅降低。但是TBM法开拓深部采矿巷道还没有应用,主要原因是矿山深部地质情况复杂,巷道断面不一,TBM适应性差。本文分析了TBM法用于金属矿山深部巷道开拓可能遇到的涌水、岩爆、高地温等风险,并对这些风险应对措施作了阐述。认为采取措施后可以消除这些风险,TBM机可以在金属矿山深部巷道中试验应用。

**关键词:**金属矿山;TBM机;开拓巷道;岩爆;深部巷道;涌水突泥;巷道风险

**中图分类号:**TD263.3+2 **文献标识码:**A **文章编号:**2096-9686(2021)07-0110-05

## Risks and solutions of the TBM method used in deep roadway boring for metal mines

ZHU Aishan<sup>1</sup>, ZHOU Huipeng<sup>1</sup>, LI Yong<sup>2</sup>

(1. Zhejiang Tunnel Engineering Group Co., Ltd., Hangzhou Zhejiang 310030, China;

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

**Abstract:** In domestic metal mines, the drilling and blasting method is used for deep mining, and it has a long construction period with high risks. The TBM method has been widely used in water conservancy, municipal engineering and highway construction because of its fast construction speed, safety and good quality. With the continuous application of “four new technologies”, the continuous improvement of equipment, and the continuous improvement of domestic TBM performance and quality, construction costs are significantly reduced. However, the TBM method has not been applied to develop deep mining roadways. The main reasons are: the deep geological conditions of the mine are complex; the roadway cross-sections change, and the adaptability of TBM is poor. This paper analyzes the possible risks of water inrush, rock burst, high ground temperature and so on when the TBM method is used in deep roadway development in metal mines, and expounds the solutions for these risks. It is concluded that these risks can be eliminated with the solutions, and TBM can be applied in deep roadway boring in metal mines.

**Key words:** metal mine; TBM machine; roadway boring; rock burst; deep roadway; water gushing and mud bursting; roadway risk

## 0 引言

深部采矿也进入了攻坚期。山东某金矿矿体多埋多年前国土资源部发布了深部找矿的意见<sup>[1]</sup>, 深1 km以下,完整花岗岩结构,勘查表明仅有极少

收稿日期:2020-09-03; 修回日期:2021-06-16 DOI:10.12143/j.ztgc.2021.07.017

作者简介:朱爱山,男,汉族,1976年生,企业技术中心副主任,高级工程师,探矿工程专业,主要从事隧道工程施工工作,浙江省杭州市古墩路673号瑞博国际A座1307室,44667868@qq.com。

引用格式: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.

量水。各类开拓巷道总长超过35 km,整个矿山工程建设期需5年。据调查采用钻爆法开拓巷道每月进尺在60~100 m,随着深度的增加,岩爆、涌水和高温问题的影响日益严重,施工速度也越来越慢。其进度不能满足矿山远景规划要求,“采掘失衡”矛盾凸显,资源优势不能得到充分发挥。而国际金价瞬息万变,投资风险和资金成本均高,必须改变开拓方法,早日生产。

TBM法施工速度快、安全、质量好,在水利、市政、公路、煤矿等<sup>[2-4]</sup>运用已很多,但至今国内深部金属矿山巷道采用TBM法开拓还未见有报道。王富林<sup>[5]</sup>对深部复杂岩层巷道围岩控制与支护技术做了研究;刘永等<sup>[6]</sup>做了应力巷道深部开采支护方式的研究;黄丹等<sup>[7]</sup>做了TBM在地下金属矿山应用中的发展现状与趋势分析。针对本黄金矿巷道,相关单位作了充分的调研和论证,决定采用TBM法施工。通过实践,总结TBM在矿山使用方法,推动矿山事业发展,并在正式使用前对各种风险进行充分分析,提前采取相应的预防措施。

## 1 金属矿山TBM法开拓巷道风险

TBM法施工速度是钻爆法的4~10倍,用人少,但施工也存在风险:一是设备选型风险;二是地质原因造成的岩爆问题、围岩变形过大卡机问题、不良地层涌水或突泥问题和高温施工环境等问题。根据2019年公开资料统计了42条TBM法隧道,因地质原因影响造成施工困难的有11条,其中完全失败的有4条;只有1例为设备自身选型不当施工进度缓慢。其占比见图1。

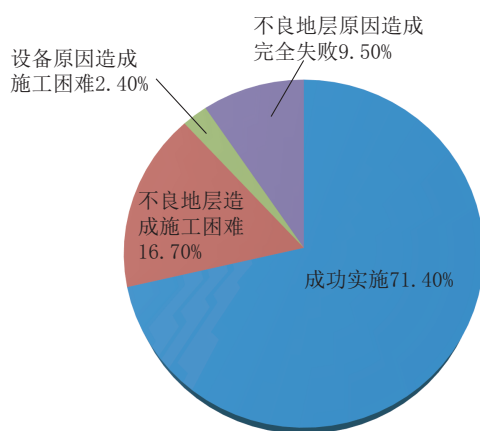


图1 TBM法隧道施工情况

Fig.1 Tunnel construction results by the TBM method

2019年10月文登抽水蓄能项目排水廊道施工采用一台直径3.53 m凯式TBM机<sup>[8-9]</sup>,成功穿越了抗压强度140~200 MPa、石英含量50%~60%的花岗岩地层,且顺利通过8个30 m转弯半径S形弯,日掘进27.548 m。2020年5月10日,世界首台矿用小转弯全断面硬岩掘进机正式下线<sup>[10]</sup>,将用于贵州省四季春煤矿。据不完全统计,国外已有100台TBM设备在60余座矿山开挖超过220 km的矿山井巷工程。随着国产TBM装备性能的提升和深部地质探测技术的发展,金属矿山TBM法施工开拓巷道成为可能。

以上数据及案例表明:设备选型不当或设备自身质量问题造成失败的很少,不良地层又是卡机的主因,随着TBM质量和技术的提高,地质原因仍是造成TBM法失败的主因<sup>[11-12]</sup>。

## 2 地质报告不详造成TBM选型不准

TBM法隧道较长,往往穿越多座山峰,按照勘查标准勘查对环境的破坏很大,所以勘查详细程度多数不够,故在TBM选型时缺乏针对性设计,一旦地层有变化,本身自带的超前地质预报系统又没有很好发挥作用,就会对前方地质情况做出错误判断。在没有预支护的情况下,TBM贸然推进,就容易出现水淹TBM或塌方等严重问题。

金属矿山勘查相对市政、交通等工程勘查详细程度更高,且多集中在一定区域,岩性相对单一。深部岩层多为完整的火成岩,透水量极低,有利于TBM法应用。但随着深度的增加岩爆发生的概率越来越高;按照每100 m升温1.8℃,深部巷道温度也在30℃以上;同时随着深度的增加空气中氯离子含量高,易造成设备腐蚀;如果有破碎带涌水突泥的风险也愈高。

## 3 风险应对措施

### 3.1 岩爆问题

根据冯夏庭等<sup>[13]</sup>、江权等<sup>[14]</sup>、于洋等<sup>[15]</sup>对深埋隧洞岩爆研究,岩爆形成有3种因素:(1)断裂、硬性结构面对岩爆孕育起到促进作用;(2)受爆破扰动诱发的时滞型岩爆;(3)底板开裂及上抬岩爆。TBM法巷道主要是第一和第三种。较强岩爆多发生在埋深超1000 m地层,1000 m以内偶有小型岩爆,其形成机理易于分析,但要判断在哪里出现还很难实

现。通过以下措施可以降低岩爆危害:

(1)对于具有强岩爆风险的深埋地下工程,应加强岩爆监测(微震监测),及时掌握岩体破坏趋势,基于微震信息演化可以定量地进行岩爆预警和动态调控。

(2)初期支护可以减少岩爆。按岩爆监测数据调整并加强Ⅱ、Ⅲ类围支护参数。

(3)较慢的掘进施工速度,可使围岩应力重新分布,降低岩爆风险。

(4)圆形较小断面,平顺的隧道轮廓有利围岩应力重新分布。

(5)应力集中区,可采用钻孔释放应力,对干燥岩石不间断洒水用于软化岩石。

### 3.2 高温环境

根据环境温度及其和人体热平衡之间的关系,通常把35℃以上的生活环境和32℃以上的生产劳动环境作为高温环境。为保证良好劳动环境,通风是最有效的方法,也较为简单。长时间在外作业工人同时辅以矿井热害气冷式个体防护服,同时TBM后配套设置空调房,确保人员安全。

### 3.3 涌水或突泥问题

预防涌水或突泥,关键是超前地质预防,应采取物探和钻探相结合的方法确定地质情况,再采用分段式膜袋法注浆工法。

#### 3.3.1 TGP206A地质超前预报仪预报

利用在隧道围岩内以排列方式激发的弹性波,在向三维空间传播的过程中,遇到岩体弹性阻抗界面,即地质岩性变化的界面、构造破碎带、空洞、岩溶和岩溶发育带等,会产生弹性波的反射,这种反射回波通过预先埋置在隧道围岩内的检波装置接收下来,再用处理系统锁定掌子面前方一定角度范围,提取反射回波并对其旅行的时间、传播的衰减以及相位的变化等进行分析,进而对隧道掌子面前方的岩体地质条件做出预报和判断。

#### 3.3.2 钻机水平超深孔钻探

根据地质超前预报情况再设计置探水钻孔位置、方位、倾角、深度以及钻孔数目。通常采用三角布置,顶部两侧各一个,底板一个,中间一个,孔深50 m。

#### 3.3.3 分段式膜袋法注浆工法

(1)注浆参数确定。采用FLAC3D进行模拟,根据勘察成果、现场实际经验,给出合理的初始参

数,对注浆加固范围,径向加固厚度,掌子面前方加固长度等参数进行分析优化处理。普通水泥-水玻璃双液浆适用于有水的中粗砂、粗砂层、砂砾石、砂卵石以及断层破碎带注浆堵水工程。其特点是:胶凝时间可控,可以达到控域注浆目的;早期强度较高,利于注浆后就立即进行开挖施工。在有水尤其是富含水的地层中,可以达到快速凝固,防止浆液被水稀释,影响注浆效果。

(2)注浆工艺。止浆岩盘→钻孔→制作膜袋注浆管→分次分段注浆。

(3)钻孔设备。钻爆法通常采用锚固钻机,TBM法隧道钻机设置:尽可能靠近工作面,具备大于50 m钻深、孔径110 mm为宜。

### 3.4 TBM需增强针对性设计

矿山巷道随矿体位置设计,转弯多在30 m以内,断面类型多,竖井、斜井与平洞交织,设计阶段就要开始考虑断面的统一和坡度要求。TBM机可据此作针对性设计,提高防腐能力和其适应性。

#### 3.4.1 超小转弯半径的适应性

V型推进系统设计详见图2,可实现最小25 m的转弯半径。

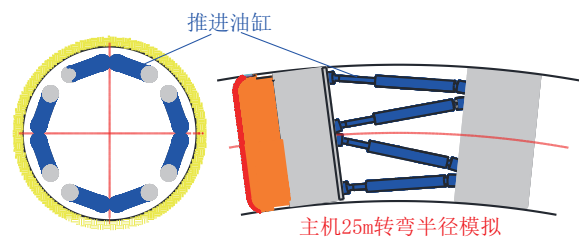


图2 V型推进系统模拟

Fig.2 Simulation diagram of the V-type propulsion system

#### 3.4.2 超前钻探及预支护岩石定向钻技术

TBM法隧道,超前预注浆支护多在护盾后施作扇形孔,再注浆,正面注浆孔较少。而岩石定向钻双杆空气锤技术可通过正面施作定向孔,实现精准注浆,同时也减少了钻孔数量。双杆空气锤定向钻在钻进硬岩时,与传统旋转钻头相比,双层杆钻机与空气锤组合可以提高钻进效率。空气锤采用双转向点设计,结合了板条钻头和二度弯曲接头,在出、入岩层过渡时,转向响应速度更快。高频空气锤振动(35~38 Hz)极其平稳,对钻机和电子设备冲击较小。见图3。

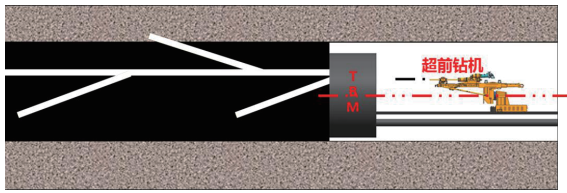


图3 TBM配套岩石定向钻示意

Fig.3 TBM complete with rock directional drilling

### 3.4.3 后配套侧卸校车

出渣运输占整个施工成本的10%~20%，是影响掘进速度的关键条件之一。坡度 $\gt 11^\circ$ 的斜井、平洞可采用内燃卡车运输，采用钻爆法修整调车及避车道。校车作为后配套临时贮料箱，容积与转运卡车到位间隔时间相适应，在运输间断期间进行换步，做到施工不间断。

## 4 经济分析

(1)随着电子化雷管的推广普及，炸材的支出成

本也大幅度提高，钻爆法施工的价格优势已经无法弥补其安全性差、功效低的缺点。另外人工成本的增加同样使钻爆法施工趋于落后的局面。

(2)钻爆法施工通风要求及成本远远高于TBM法。深部采矿环境温度高达30~35℃，TBM法机械化程度高，用人少，环境好，有利于施工阶段安全。

(3)符合地质条件要求，能控制超欠挖，可大大减少支护工程量。支护量仅为矿山法的5%~15%。

(4)TBM法施工成本为钻爆法的4~5倍，随着施工洞长加大，大于5000m后，其施工成本呈下降趋势，预期可降至钻爆法的2~2.5倍；但掘进速度快，环保，是发展方向。同时计算综合经济效益和时间成本、金融投资成本，TBM可以满足快速施工、安全管理，降本增效的目的。

(5)TBM法与钻爆法施工对比见表1。

表1 TBM法与钻爆法巷道优缺点对比

Table 1 Comparison of advantages and disadvantages between the TBM method and the drilling blasting method

施工方法	TBM法	钻爆法	备注
经济长度/km	$\geq 5$	$\leq 3$	
月进尺/m	400~1500	100~250	
隧道线形/m	$R \geq 30$	无限制	
坡度	陡坡需加撑靴	可做任何坡度	
综合价/(元·m <sup>-1</sup> )	28000~35000	6000~7000	巷道截面 30 m <sup>2</sup>
	24000~32000	4000~6500	巷道截面 20 m <sup>2</sup>
	18000~24000	3000~4000	巷道截面 10 m <sup>2</sup>
准备时间/d	120~180	7	
支护时间	同步	不能同步	
支护比例/%	15~5	100~95	
运输占总成本/%	10~25	20~30	
刀具成本/(元·m <sup>-3</sup> )	10~100	40~120	
断面形状	圆形	任何形状	
环境影响	小	较大	

## 5 结语

(1)金属矿山的勘查比普通市政、交通工程类的勘查更为详细，且深部岩石岩性大多数单一，完整，水量少，地质方面的风险相对较小。

(2)小转弯TBM机等已经有在类似地层成功实用的案例，设备自身质量或选型原因的风险较小。

(3)针对可能出现的风险，也有针对性的应对措施，这些措施均有成功的实例，不良地层风险处理风险较小。

(4)TBM法机械化程度高，人工少，安全风险也很小。

(5)TBM机的价格相比以前已降低了很多。

综上所述，笔者认为TBM用于金属矿山巷道

是可行的。

TBM用在金属矿山,对推进矿山尤其是深井矿山开拓机械化、解决深井开拓“三高一扰动”(高井深、高地应力、高温,强烈的采矿扰动)这一国际性难题具有深远意义,应尽快开展相应工作。

### 参考文献(References):

- [1] 国土资源发[2007]299号,国土资源部关于促进深部找矿工作指导意见[Z].  
No.299 [2007] Issued by the Ministry of Land and Resources, Guidance of the Ministry of Land and Resources on promoting deep prospecting[Z].
- [2] 张兵,于德洋,韩佳霖,等.TBM法综合施工在煤矿长斜井中的应用研究[J].科技与企业,2014(2):145-145.  
ZHANG Bing, YU Deyang, HAN Jialin, et al. Study on Application of TBM comprehensive construction in long inclined shaft of coal mine[J]. Technology and Enterprise, 2014(2):145-145.
- [3] 李玉波.当金山特长隧道钻爆法与TBM施工地质条件分析[J].铁道建筑,2012(12):64-66.  
LI Yubo. Analysis of drilling and blasting method and TBM construction geological conditions of Dangjinshan extra long tunnel [J]. Railway Engineering, 2012(12):64-66.
- [4] 周建军,杨振兴.深埋长隧道TBM施工关键问题探讨[J].岩土力学,2014,35(S2):299-305.  
ZHOU Jianjun, YANG Zhenxing. Discussion on key issues of TBM construction for long and deep tunnels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014,35 (S2): 299-305
- [5] 王富林.深部复杂岩层巷道围岩控制与支护技术研究现状与实践[J].西部探矿工程,2014,26(5):171-173.  
WANG Fulin. Research status and practice of surrounding rock control and support technology for deep and complex rock roadway [J]. West-China Exploration Engineering, 2014, 26 (5) : 171-173.
- [6] 刘永,刘玉元,王树良.应力巷道深部开采支护方式探讨[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2004,31(10):58-60.  
LIU Yong, LIU Yuyuan, WANG Shuliang. Discussion on support mode of deep mining in stress roadway[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2004,31(10): 58-60.
- [7] 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 TBM application in underground metal mines [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2019,9(11):108-121.
- [8] 刘传军.应用硬岩掘进机抽蓄电站施工更安全更高效[N].国家电网报,2020-05-19.  
LIU Chuanjun. Construction of pumped storage power station with hard rock roadheader is safer and more efficient[N]. State Grid News, 2020-05-19.
- [9] 徐艳群,尚海龙,刘传军.斜井隧道掘进机在抽水蓄能电站施工中的应用[J].水电与抽水蓄能,2019,5(5):98-101.  
XU Yanqun, SHANG Hailong, LIU Chuanjun. Application of inclined tunnel boring machine in construction of pumped storage power station [J]. Hydropower and Pumped Storage, 2019, 5 (5):98-101.
- [10] 世界首台矿用小转弯全断面硬岩掘进机在郑州下线[N].河南日报,2020-05-12  
The world's first mining small turn full face hard rock roadheader is offline in Zhengzhou[N]. Henan Daily, 2020-05-12.
- [11] 赵第厚.TBM卡机的原因和对策[J].山西水利科技,2008(3):46-48.  
ZHAO Dihou. The causes of seizing TBM and countermeasures [J]. Shanxi Hydrotechnics, 2008(3):46-48.
- [12] 唐华辉.高地应力中硬围岩环境下TBM卡机机理与对策研究[D].成都:成都理工大学,2018.  
TANG Huahui. Research on mechanism and countermeasures of TBM jamming in medium hard surrounding rock with high ground stress[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2018.
- [13] 冯夏庭,张传庆,陈炳瑞,等.岩爆孕育过程的动态调控[J].岩石力学与工程学报,2012,31(10):1983-1997.  
FENG Xiating, ZHANG Chuanqing, CHEN Bingrui, et al. Dynamic control of rockburst incubation process [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31 (10) : 1983-1997.
- [14] 江权,冯夏庭,李邵军,等.高应力下大型硬岩地下洞室群稳定性设计优化的裂化-抑制法及其应用[J].岩石力学与工程学报,2019,38(6):1081-1101.  
JIANG Quan, FENG Xiating, LI Shaojun, et al. Cracking inhibition method for stability design optimization of large underground caverns in hard rock under high stress and its application [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019,38(6):1081-1101.
- [15] 于洋,冯夏庭,陈天宇,等.深埋隧洞不同掘进方式下即时型岩爆微震对比分析[J].东北大学学报(自然科学版),2014,35(3):429-432.  
YU Yang, FENG Xiating, CHEN Tianyu, et al. Comparative analysis of immediate rockburst microseisms under different excavation methods of deep tunnels[J]. Journal of Northeast University (Natural Science Edition), 2014,35(3):429-432.

(编辑 荐华)