

•复杂艰险山区重大工程与环境•

DOI:10.12454/j.jsuese.202400650



深埋隧道敞开式 TBM 岩爆地层防控方法与护盾抗冲击研究

鲁义强¹, 贺 飞¹, 王明耀¹, 邢鋆博¹, 廖建兴², 冯欢欢³, 马天辉⁴

(1. 中铁工程装备集团有限公司, 河南 郑州 450016; 2. 贵州大学 土木工程学院, 贵州 贵阳 550025;
3. 中铁隧道局集团有限公司, 广东 广州 511457; 4. 大连理工大学 建设工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘 要:为研究深埋高应力隧道敞开式 TBM 岩爆地层防控方法, 解决敞开式 TBM 在岩爆地层中施工风险高、效率低的难题, 从围岩的损伤程度、力学原理、岩爆发生区域等方面探讨了钻爆法和 TBM 法施工岩爆特征的差异性。基于对 TBM 施工引发岩爆的时空分布规律及现有岩爆预警方法的分析, 系统阐述了敞开式 TBM 针对不同等级岩爆地层的应对技术。提出 TBM 盾体抗岩爆仿真模拟方法, 阐述了模型简化依据, 并分析了中等、强、极强 3 种岩爆等级下盾体结构及顶升油缸的结构响应。结果表明: 在中等、强、极强岩爆等级下, 盾体承受的最大冲击力分别为 4 998、16 564 及 70 106 kN, 单根顶升油缸承受最大冲击力分别为 5 618、11 293 及 18 873 kN, 盾体的最大变形分别为 15.2、18.6 及 77.3 mm; 对比仿真变形结果与现场实际盾体变形可知, 数值模拟方法具有可靠性, 并据此提出采用高强度材料、增大盾体尾部抗弯截面系数及缩短悬臂长度以提升盾体抗冲击能力的优化措施。通过对 TBM 在不同等级岩爆下的防控措施进行分析, 系统提出针对不同等级岩爆的防控理念及防控建议: 针对轻微与中等岩爆, 以被动防控为主, 强化盾尾应急喷锚支护; 针对强烈岩爆, 采用被动与主动相结合的方式, 综合运用“钢管片+辅助推进”及高吸能锚杆等技术; 针对极强岩爆, 应以主动防控为核心, 建议采用钻爆导洞实施超前应力释放, 并提出研发具备开口能力刀盘的改进措施, 以提高 TBM 应对复杂岩爆地层的适应能力。

关键词: 岩爆; 钻爆法; TBM 法; 防控理念; 防控技术; 顶护盾; 数值模拟

中图分类号: U45

文献标志码: A

文章编号: 2096-3246(2026)01-0204-13

随着国民经济的高速发展, 地下基础设施建设正以前所未有的速度向深部发展。TBM 因其高效破岩、连续出渣、快速支护、安全环保、综合效益高等优点, 被广泛应用于国内外地下工程领域, 如瑞士洛茨堡基地隧道、哥达基地隧道、吉林引松供水工程、大瑞铁路高黎贡山隧道等^[1-2]。然而, 埋深的增加和地应力水平的增高导致岩体赋存的地质环境更为复杂, 开挖诱发的岩爆灾害更加突出、严重, 不仅延误工程进度, 更会造成人员伤亡及经济损失, 影响隧道安全高效施工。例如: 锦屏 II 级水电站引水隧洞在建设过程中遭遇多次强烈~极强岩爆, 最大爆坑深达 10 m, 多次导致设备受损严重^[3]; 陕西引汉济渭工程隧洞最大埋深超 2 000 m, 在施工过程中发生超过 800 次岩爆, 其中强烈岩爆 100 余次, 对 TBM 施工安全和掘进速度造成极大影响^[4]。

近年来, 国内外众多专家学者针对岩爆灾害的发

生机理、发生条件和灾害等级等多方面难题, 采用室内试验、数值模拟和现场监测等手段探索岩爆的机制和影响因素, 取得了丰硕的成果^[5-7], 但是想要完全了解岩爆这一复杂动态现象仍有一定难度。冯夏庭^[8]和陈炳瑞^[9]等通过对锦屏 II 级水电站引水隧洞强岩爆洞段现场岩爆资料及微震监测数据的统计与分析, 揭示了深埋大理岩隧洞即时性应变型岩爆、即时性应变-结构面滑移型岩爆及时滞型岩爆的孕育规律和机制; 钱七虎^[10-11]依据岩爆发生机理的不同, 将岩爆分为应变型和滑移型两类, 并详细阐述了岩爆地质灾害的定义和分类、岩爆的预测机制、岩爆监测预报的理论基础和工程实践及岩爆灾害的施工对策等; 周青春等^[12]根据国内外的研究成果对岩爆进行了数学描述, 并指出岩爆并非单一因素导致的事件, 而是典型的多因素综合作用的结果; 薛亚东等^[13]通过引入岩爆倾向性指

收稿日期: 2024-08-15 修回日期: 2024-11-21 网络出版日期: 2025-02-26

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB2302401); 中国中铁股份有限公司科技研究开发计划(cz02-专项-03)

作者简介: 鲁义强(1989—), 男, 高级工程师, 博士。研究方向: TBM 设计和隧道防灾。E-mail: yiqianglu007@163.com

标,考虑围岩等级对岩爆倾向性的影响,提出综合考虑强度准则和能量理论的应变型岩爆等级判断方法,并进行了工程验证。

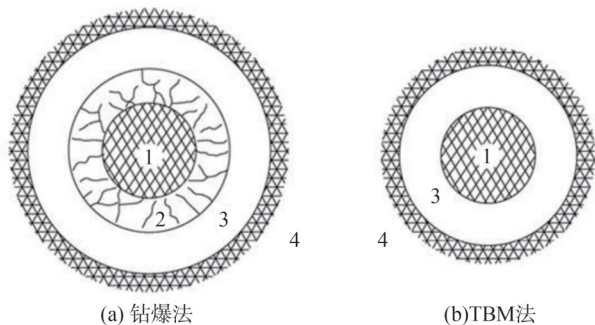
在岩爆防控方面,严鹏^[14]、汪珂^[15]等认为工程地质条件下岩爆防治具体措施虽然存在差异,但应符合以下原则:超前应力释放、减小开挖扰动、改善围岩条件,以及设计具有适应大变形及较强抗冲击能力的“刚柔相济”的支护结构;王克忠等^[16]分析了滇中引水工程香炉山深埋隧洞TBM段岩爆主动防控作用机制及不同施工参数下的应力和能量释放效果,结果显示,超前主动防控能够通过预先集中掌子面前方岩体应力,实现TBM二次开挖时的应力“削峰”,避免能量突然聚集,从而降低岩爆风险;赵勇等^[17]系统分析了岩爆的预测、判识及综合防控技术,构建了以“精准探—准确辨—主动控—系统防—长期测—动态管”为核心的全过程、全时域的岩爆综合防控技术体系,并总结了现场实际隧道岩爆防控的有效经验。然而,TBM掘进时的岩爆通常发生在机头覆盖的数米长度范围内,受到TBM护盾结构的支撑,导致护盾被动承受了岩爆带来的动态能量,因此,对于TBM而言,护盾能否承受岩爆释放的能量是核心问题。同时,护盾区域占据了隧道的大部分空间,导致难以对岩爆灾害进行事前处理;为应对岩爆带来的围岩破碎与落石风险,支护设计中需对破碎落石区域进行加强支护。轻微岩爆和中等岩爆对TBM施工安全和进度影响较小,主要采取钢筋网支护、机械涨壳式预应力注浆锚杆、水涨式锚杆、纳米仿钢纤维混凝土等综合防治措施^[18];强岩爆对TBM施工进度影响很大,如:锦屏Ⅱ级水电站排水洞TBM施工进入强岩爆区后,由于支护被毁,清渣和恢复支护工作量巨大,降低了TBM施工速度,4个月仅掘进600 m^[19]。为了规避强岩爆风险,设计了超前导洞施工方案,即在掌子面上部用钻爆法开挖导洞,然后TBM掘进剩余断面^[20]。该方法为极强岩爆地层的防控提供了有益的借鉴,但对掘进效率影响较大^[4]。

目前,与钻爆法施工相比,TBM施工条件下的岩爆控制手段相对匮乏,针对护盾区域如何提高抵抗岩爆动态荷载的能力和不同岩爆等级下TBM法防控措施的研究较少。本文主要对比分析了深埋高应力隧道工况下TBM法和钻爆法施工岩爆特征的差异性,研究了敞开式TBM应对轻微、中等、强烈和极强岩爆的控制技术,探究不同等级岩爆抛射动能对护盾的影响规律,进而探讨极强岩爆地层TBM安全通过的可行性技术。

1 不同施工方式岩爆特点对比

隧道硬岩岩爆发生前通常呈现围岩表层小变形但内部多破裂的特征。岩爆孕育的本质是临空岩体积聚的应变能突然释放,导致围岩发生类似爆炸的脆性断裂,造成岩体大量崩落^[21]。从岩爆发生机理来看,TBM法和钻爆法没有本质的差别,二者在诱发岩爆方面的不同之处主要体现在:

1) TBM开挖对围岩的损伤破坏程度较低,有利于维持掌子面岩石的脆性特性。如图1所示:使用钻爆法开挖隧洞时,围岩存在一个裂纹区,即直接影响区(图1中的第1影响区),而使用TBM法开挖隧洞时没有这一裂纹区;无论使用哪种方法开挖,围岩都会出现地应力重分配但围岩仍完整稳定的区域,即图1中的第2影响区,但TBM法开挖时的第2影响区比钻爆法更小^[22]。从这个角度来看,TBM掘进扰动小,围岩累积的弹性势能释放时间更长,导致时滞型岩爆发生的概率更高;钻爆法的爆破损伤与使用应力解除爆破法来预防岩爆发生的原理相同,反而有助于抑制岩爆的发生,这在低岩爆环境下更加明显。例如:在锦屏Ⅱ级隧道的东段K12+800桩号附近区域,辅助洞钻爆法掘进时的主要破坏形式为即时性破坏,而在排水洞区域TBM掘进时,时滞型岩爆时常发生。冯夏庭等^[23]也得到在相同条件下,TBM法施工过程发生时滞型岩爆的概率远高于钻爆法。



1. 隧洞; 2. 围岩第1影响区; 3. 围岩第2影响区; 4. 围岩未影响区。

图1 钻爆法与TBM法对圆形隧洞围岩的影响^[22]

Fig. 1 Influence of drilling and blasting method and TBM method on the surrounding rock of circular tunnel^[22]

2) 从力学原理上来看,TBM采用的小进尺掘进方式可以控制能量释放率的大小,工程扰动造成的影响更小,围岩应力相对较低,有利于控制掌子面的稳定性;采用钻爆法掘进,能量释放率更高,会使得围岩所承受的荷载超过其承载极限,更易引起坍塌、冒顶等灾害事故,从这个角度分析,TBM法的优势更明显。Zha等^[24]分析了全断面钻爆法、分布开挖钻爆法和全断面TBM法的开挖扰动应力演化规律和扰动应力路

径,结果如图2所示,总结得到TBM法开挖过程中的动态扰动应力更小。

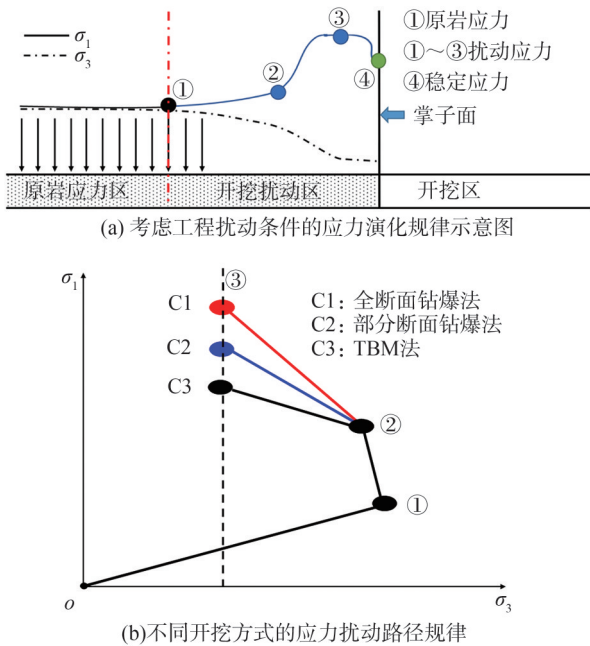


图 2 全断面钻爆法、分布开挖钻爆法和全断面 TBM 法应力演化和路径规律^[24]

Fig. 2 Stress evolution and path law of full section drilling and blasting method, distributed excavation drilling and blasting method and full section TBM method^[24]

此外,学者们通过系统探索工程扰动条件下的深部围岩应力环境演化共性特征,提出全断面钻爆法、部分断面钻爆法及TBM法3种不同开挖扰动条件下的应力演化规律控制方程见式(1)^[25-27]:

$$\begin{cases} \sigma_1 = \alpha \lambda \gamma H, \\ \sigma_3 = \frac{2}{5} \gamma H \end{cases} \quad (1)$$

式(1)及图2中, σ_1 和 σ_3 分别为最大主应力和最小主应力, λ 为水平应力与垂直应力之比, α 、 γ 和 H 分别为扰动应力升高系数、地层容重和隧道埋深。全断面钻爆法、部分断面钻爆法、TBM法的 α 取值分别为2.81、(2.00, 2.22)、[1.59, 2.00]。

式(1)体现了隧道掘进中完整的应力演化过程,即轴向压力从原岩应力状态逐渐升高至峰值,随后因岩体破裂卸荷降低至残余强度,而侧向压力则自初始状态不断卸载,并逐渐降至较低水平。中国某抽水蓄能电站硬岩隧道施工过程中围岩松弛深度的实际监测数据表明:该硬岩隧道TBM法的围岩松弛深度及岩体波速降低率远小于钻爆法,结果见表1,说明TBM法施工隧道的围岩稳定性及其完整程度明显优于钻爆法^[28]。

TBM法与钻爆法的围岩松弛圈对比如图3所示,其中No.1~No.4为检测孔,在相同工程地质条件下,钻爆

法开挖隧洞的围岩松弛深度比TBM开挖隧洞大70~110 cm。一方面,由于爆破对围岩的扰动大于TBM,因此松弛圈内围岩的损伤程度也大于TBM法,成巷质量有所下降;另一方面,当TBM掘进时,围岩支护及时,限制了松动圈向深部扩展,利于围岩的整体稳定,而钻爆法下的系统支护通常落后于掌子面一段距离,无法限制围岩的变形破坏,甚至成为了围岩累进性破坏的突破口。

表 1 某抽水蓄能电站硬岩隧道TBM法和钻爆法围岩松弛特征对比

Tab. 1 Comparison of surrounding rock relaxation characteristics between TBM method and drilling and blasting method in a hard rock tunnel of a pumped storage power station

开挖方法	检测孔序号	检测孔深/m	松弛深度/m	松弛带波速/(m·s ⁻¹)	完整岩体波速/(m·s ⁻¹)	岩体波速降低率/%
钻爆法	1	6.0	1.0	4 370	5 260	16.9
	2	6.0	1.2	4 970	5 040	1.4
	3	6.0	1.2	4 540	5 740	20.9
	4	6.0	0.8	5 430	5 550	2.2
TBM法	1	2.6	0.1	5 880	6 032	2.5
	2	2.5	0.1	5 850	5 916	1.1
	3	2.6	0.1	5 880	5 924	0.7

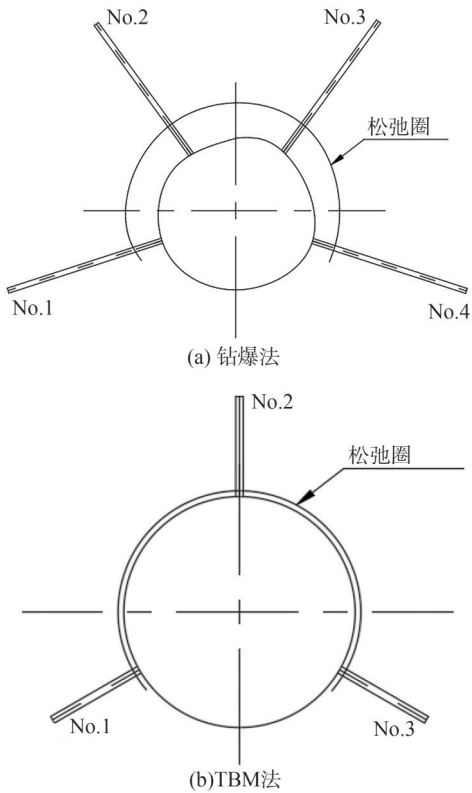


图 3 钻爆法与TBM法的围岩松弛圈对比

Fig. 3 Comparison of surrounding rock relaxation zones between drilling and blasting method and TBM method

3)岩爆主要发生在新开挖面附近,由于钻爆法掘进时可以对掌子面实施超前处理,使得岩爆高发段存在人工干预的现实条件;当TBM掘进时,受限于TBM设备自身影响,空间狭小,很难在岩爆发生前实施有效干预,绝大部分的岩爆出现在掌子面前方和机头部位,在护盾部位揭露时围岩已经破坏。由于TBM法对岩爆处理滞后,TBM发生链式岩爆的概率更高。冯夏庭等^[23]研究发现,TBM在发生高等级岩爆前往往会有

低等级的岩爆预先发生。从这个角度讲,钻爆法掘进时可以实现以“事先控制”为主的思想,TBM掘进时则需要对护盾尾部进行加强支护。对于岩爆碎块冲击,护盾外侧部分岩爆能量等级高,冲击力强,产生的岩块重量大,且护盾的盾尾呈悬臂结构,当岩爆冲击力及围岩碎块重力超过护盾承受极限时,会引起护盾收缩或盾尾变形,从而吸收岩爆释放能量,削弱岩爆冲击危险,如图4所示。

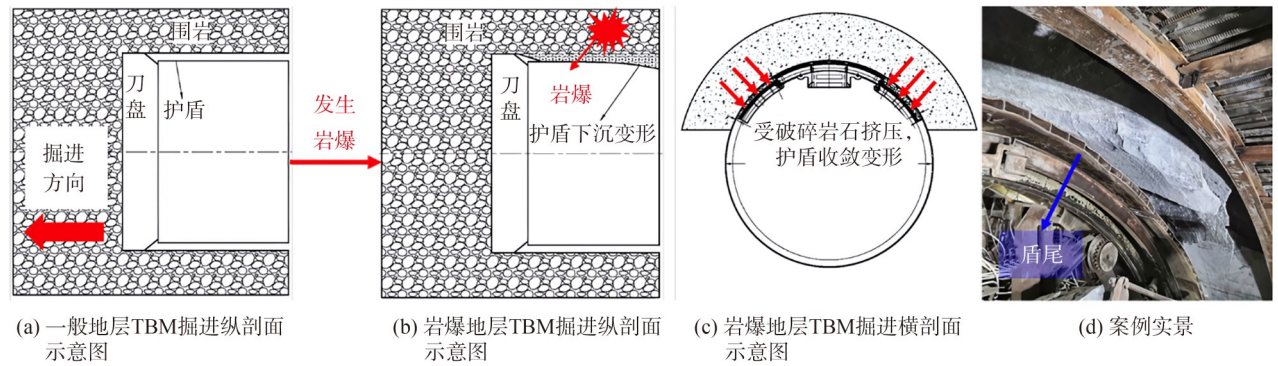


图4 TBM掘进时的护盾支护作用^[29]
Fig. 4 Shield support function during TBM excavation^[29]

2 敞开式TBM岩爆地层应对技术

2.1 TBM法岩爆时空特征规律分析

理解岩爆的时空特征分布规律有助于针对性地提出岩爆应对方法。杜立杰等^[4]对引汉济渭工程中的788组岩爆数据进行时空特征规律统计分析,得出以下结论:1)90.0%以上岩爆的滞后时间在24 h以内,开挖后10~24 h发生岩爆的频率最高,约有9.0%的强烈岩爆滞后时间为24~48 h。2)岩爆到掌子面的距离多为5~15 m,随着岩爆等级的增强,岩爆到掌子面的距离有所下降,31.1%的强烈岩爆发生在护盾之前。3)100.0%中等~强烈和98.2%强烈岩爆单次岩爆段长度在5 m以内;岩爆多在顶拱120°范围内发生,98.1%、97.5%、100.0%的中等岩爆、中等~强烈岩爆和强烈岩爆在顶拱发生,15.9%~38.9%岩爆在两侧边墙发生。

2.2 岩爆预警

岩爆预警有助于提前预知岩爆发生的位置及强烈程度,对岩爆防控至关重要。目前,岩爆预警方法主要分为直接接触监测和地球物理法。前者如钻孔应力测量、钻屑法等,后者包括地震检波器、地震CT、电磁辐射、微震监测等。其中,微震监测是目前实时监测岩爆孕育过程的常用技术手段之一,被广泛用于地下工程岩爆监测预警^[30],即:在距掌子面200 m内布置若干微震传感器,实时感知掌子面附近微震事件,通过分析微震事件的数量及其震源参数的时空演化信息,实现

对隧道掘进过程中岩爆风险的动态预警^[21]。实际工程中对于岩爆的综合预警应遵循“三变”原则,即:随地质和岩体信息丰富而变、随设计变更而变和随施工动态而变。当地质条件变化、设计变更和施工活动变化时,应根据基于微震信息的岩爆预警法对岩爆孕育过程进行动态预警^[22]。

2.3 轻微岩爆和中等岩爆地层TBM应对技术

在轻微岩爆和中等岩爆地层,TBM自身一般具备应对能力。以瑞士横穿阿尔卑斯山脉的Loschtberg隧道、Gottahot隧道和引汉济渭隧道为例,防控理念为被动防控,主机区域的岩爆以护盾本身抵抗为主,对盾尾L1区尽可能快地进行初喷处理,喷层应尽可能地接近护盾,形成早期封闭。轻微岩爆和中等岩爆地层TBM应对技术相对成熟,不再赘述。

2.4 强烈岩爆地层TBM应对技术

当采用TBM法在强烈岩爆地层掘进时,以引汉济渭隧道、ABH隧道为例,若岩爆等级不足以使主机护盾发生破坏,防控理念仍以被动防控为主。鉴于TBM具备良好的挂网和安装拱架的能力,现场可以采用拱架+挂网,乃至拱架+钢筋棚的方式,防止破碎岩块造成安全事故。根据工程经验^[4]可知,仍有约20.0%的岩爆发生在护盾范围之外,此区域宜选用具有高吸能特性的锚杆,如锥形锚杆、Garford实心锚杆、Roofex锚杆、D型锚杆、Yield-Lok锚杆、NPR锚杆等,以主动控制围岩,避免二次岩爆的发生。为了将大部分岩爆的发生控制在掌子面和护盾区域,TBM

应主动控制进尺量,并且在盾尾处采取“小间距钢拱架+密集钢筋排”的支护方式支撑岩爆产生的破碎围岩,如图 5 所示。



图 5 “小间距钢拱架+密集钢筋排”支护方式
Fig. 5 “Small spacing steel arch frame plus dense steel reinforcement” support method

2.5 极强岩爆地层 TBM 应对技术

当 TBM 掘进遇到极强岩爆时,其后果可能是灾难性的。TBM 在极强岩爆风险条件下的应用案例有挪威 Kobbelv HPS 输水隧洞、锦屏 II 级水电站、巴基斯坦 N-J 水电工程等。挪威 Kobbelv HPS 输水隧洞和巴基斯坦 N-J 水电工程都发生了人员伤亡、设备损坏的灾害;锦屏 II 级水电站的极强岩爆导致工程中断,两台 TBM 主动撤出。

在 TBM 掘进条件下,掌子面后方 5 m 范围属于机头占据的范围,工程中难以对这一范围内的围岩状态采取任何有效干预措施,使在 TBM 掘进条件下对岩爆进行控制显得“束手无策”。而在钻爆法掘进条件下,可以采取一些有效措施进行人工干预。锦屏 II 级水电站尝试以超前先导洞施工钻爆掘进,如图 6 所示。

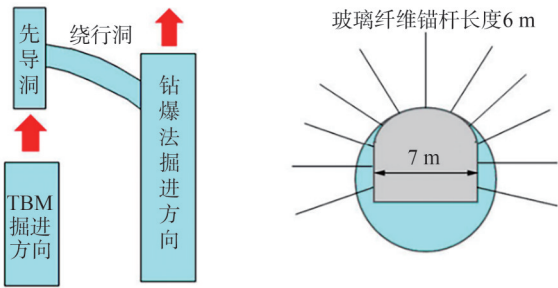


图 6 TBM 导洞法通过极强岩爆地层^[31]
Fig. 6 Using TBM tunneling method to pass through extremely strong rock burst strata^[31]

先导洞的作用是提前释放能量,为 TBM 掘进创造条件,在一定程度上解决了 TBM 针对强岩爆“束手无策”的被动局面。利用先导洞可以采取超前应力爆破及关键部位预锚等手段,将 TBM 的岩爆风险转嫁给钻爆法,使得 TBM 安全通过强岩爆风险段。但是先导洞自身并不能完全解决 TBM 扩挖时潜在的强岩爆风险,现实中可以利用先导洞采取相应的措施,把这种风险降低到 TBM 设备可以承受的范围内,其在技术上可行

并进行了一定里程的工程示范应用。

巴基斯坦 N-J 水电站是 TBM 法在极强岩爆条件下的另一个应用案例。巴基斯坦 N-J 水电站引水隧洞区域地质条件十分复杂,实际施工过程中岩爆灾害频发,其中不乏极强岩爆的出现。工程上采取主动和被动防控措施联合的方式应对岩爆灾害。其中,运用的主动防控措施包括:开挖掘进前,在掌子面顶拱 120° 范围内施作密集超前应力释放孔,并向孔中注射高压水,同时采用涨壳式锚杆进行超前支护;掌子面开挖后,立即对新揭露的围岩进行喷水软化处理。此外, TBM 采取短循环掘进,进尺控制在 0.7~1.2 m。根据现场统计记录,以上主动防控措施展现出较好的适应性,岩爆防控效果显著^[32]。

3 TBM 盾体抗岩爆仿真计算

岩爆发生过程中,主机区域因为没有支护,盾体首先承受岩爆所产生的落石冲击,盾体结构的强度和刚度直接影响到整体设备的功能使用及施工人员的安全,因此需要盾体具备一定的抗岩爆能力。岩爆过程中产生的岩块直接冲击盾体,因此可将盾体的抗岩爆计算简化为落石冲击盾体的问题,本文使用动力学仿真软件分析盾体在中等岩爆、强岩爆和极强岩爆 3 种等级下的结构受力及变形特征,并与实际盾体变形进行对比,验证了计算结果的合理性,最后提出提高盾体抗岩爆能力的针对性优化措施。

3.1 仿真模型简化

实际岩爆岩块如图 7 和 8 所示。



图 7 强岩爆在盾体上方产生的岩块
Fig. 7 Rock elements produced by strong rock burst in the real site

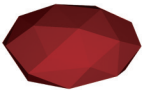


图 8 极强岩爆在盾体上方产生的岩块
Fig. 8 Rock elements produced by extremely strong rock burst in the real site

出于保守,本文计算模型在确定 3 个岩爆等级的岩块参数时,为简化模型,即假设每个岩爆等级只产

生一种尺寸岩块。参照冯夏庭等^[23]及薛景沛^[33]提出的不同等级岩爆尺寸特征,选取岩块厚度尺寸上限。不同等级岩爆的岩块特征见表2。

表 2 计算模型中不同岩爆等级的岩块特征
Tab. 2 Rock characteristics of different rock burst levels in simulation model

岩爆等级	岩块形状	岩块尺寸/ (m×m×m)	岩块质量/kg
中等岩爆		0.60×0.60×0.30	139.8
强岩爆		1.50×0.75×0.40	498.0
极强岩爆		2.00×1.00×1.00	2 400.0

根据统计数据^[4,33]分析,主机区域岩爆主要发生在顶护盾区域(图9红色框),因此选取顶护盾为研究对象。仿真计算考虑最不利工况,假设岩爆发生时岩块直接冲击盾体,且整个顶护盾区域上方均发生岩爆,产生的岩块速度方向沿盾体径向。此外,为简化计算,仅计算洞壁一层岩块,假设岩块排布为规则排布,不考虑岩块自身的碎裂特征。岩块在盾体上方的排布参数见表3。

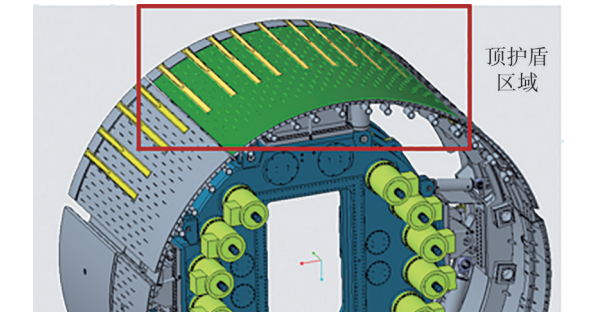
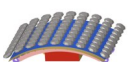
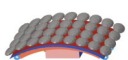


图 9 TBM 顶护盾区域
Fig. 9 TBM top shield area

表 3 盾体抗岩爆计算模型中的岩块排布参数
Tab. 3 Rock distribution parameters in shield anti-rock-burst simulation model

岩爆等级	岩块排布	岩块总数	岩块总质量/t	初速度/ (m·s ⁻¹)	岩块总冲击能量/kJ
中等岩爆		81	11.30	5	142
强岩爆		36	17.93	10	896
极强岩爆		21	50.40	10	2 520

3.2 仿真计算边界

假设顶升油缸锁死,约束顶升油缸与顶护盾的连接孔,仅放开连接孔绕销轴旋转自由度,约束其他方向自由度,顶护盾边界条件如图10所示。岩爆灾害常见于山岭隧道,选取常用的10 m级敞开式TBM作为研究对象,顶护盾结构材料为Q355,外壳厚40 mm,内壳厚20 mm,壳体之间加强筋板厚20 mm;考虑材料塑性变形,取材料屈服强度325 MPa,抗拉强度470 MPa,断裂伸长率20%;不考虑岩块的特性变化,假设岩块为弹性体,弹性模量为40 GPa,泊松比为0.3。

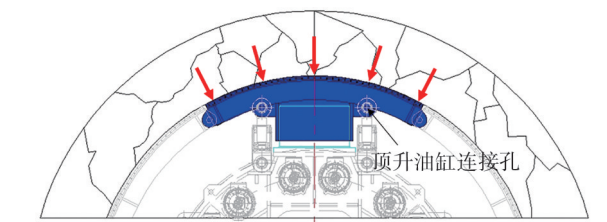


图 10 顶护盾边界条件
Fig. 10 Boundary conditions of top shield

3.3 仿真结果及分析

3.3.1 岩爆对盾体冲击力分析

岩爆发生后,盾体最先承受落石的冲击动能,因此,盾体结构的抗冲击能力对TBM设备的正常运行及人员安全具有重要意义。不同岩爆等级下盾体结构承受的冲击力如图11所示,中等岩爆、强岩爆、极强岩爆下的最大冲击力分别为4 998、16 564、70 106 kN。

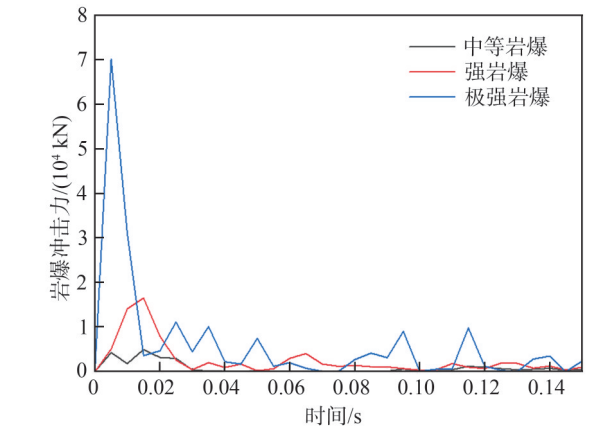


图 11 不同岩爆等级下盾体所受冲击力
Fig. 11 Impact force on the shield under different rock burst levels

3.3.2 岩爆作用下顶升油缸受力分析

岩爆发生后,落石冲击动能通过吊耳和销轴由盾体传递到顶升油缸,分析顶升油缸承受的冲击力有助于为盾体吊耳及顶升油缸安全溢流压力设计提供参考。不同岩爆等级下单根油缸受力如图12所示,中等岩爆、强岩爆、极强岩爆下单根顶升油缸承受最大冲击力分别为5 618、11 293、18 873 kN。

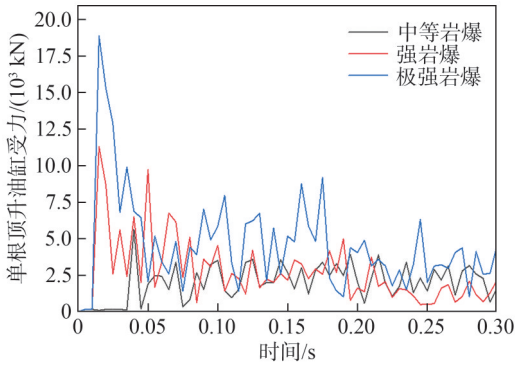


图 12 不同岩爆等级下单根油缸受力

Fig. 12 Force on a single cylinder under different rock burst levels

3.3.3 盾体变形

在 3 种不同等级岩爆的作用下,顶护盾变形如图 13 所示,中等岩爆、强岩爆、极强岩爆下的最大变形依次为 15.2、18.6、77.3 mm。

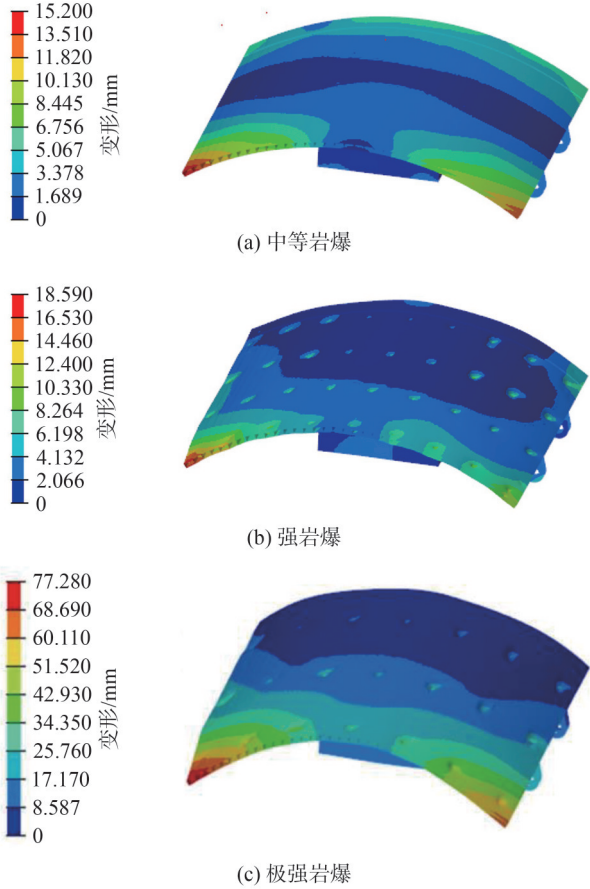


图 13 不同岩爆等级下的盾体变形

Fig. 13 Shield deformation under different rock burst levels

在 3 种等级岩爆的岩块冲击下,最大变形位置均在顶护盾尾部两侧,与实际现场经历过岩爆的顶护盾变形(图 14)类似,验证了仿真结果的准确性。对比分析不同岩爆等级下的盾体尾部变形可知:中等岩爆下,局部壳体无明显变形;强岩爆下,局部盾壳内凹,

但内部筋板无明显变形;极强岩爆下,局部盾壳内凹,内部筋板局部弯曲变形。



图 14 现场盾体变形

Fig. 14 Shield deformation in the real site

3.3.4 盾体等效塑性应变

岩爆作用下,岩块冲击盾体产生局部塑性应变,对比分析不同岩爆等级下的盾体等效塑性应变,结果如图 15 所示。整体结构最大等效塑性应变依次为:中等岩爆 0.03,强岩爆 0.13,极强岩爆 0.36。材料塑性应变极限为 0.20,说明中等岩爆下材料变形主要以弹性变形为主;强岩爆下,岩块冲击部位出现一定程度的塑性变形,但在材料变形极限范围内;极强岩爆下,岩块冲击部位结构出现大面积塑性变形,形成一定深度的凹陷,局部塑性变形超过材料极限,发生局部开裂。

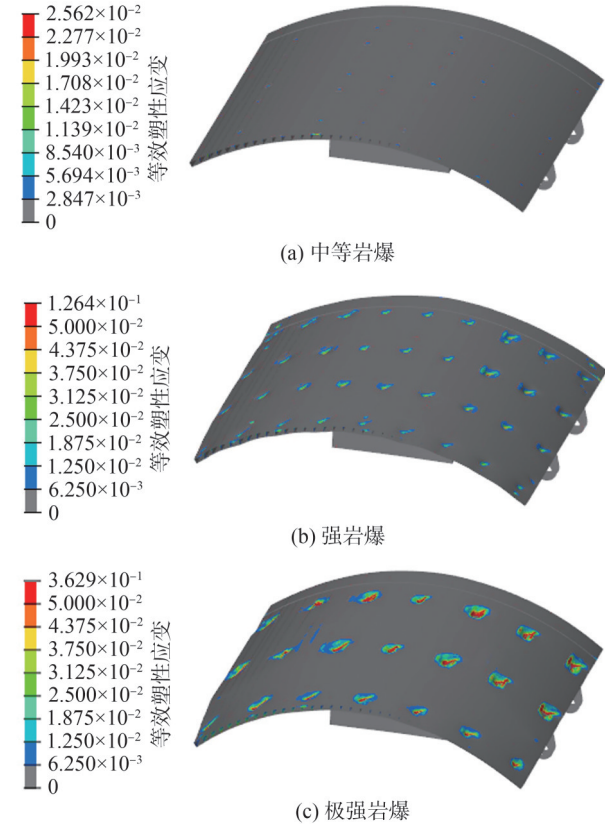


图 15 不同岩爆等级下的盾体等效塑性应变

Fig. 15 Effective plastic strain of shield under different rock burst levels

极强岩爆条件下,盾尾的大面积塑性变形和局部开裂会影响钢筋排的储藏空间,进而影响钢筋排+密集拱架这种极强岩爆条件下常用的支护方式,从而导

致盾尾无法形成封闭支护,增加人员和设备的损毁风险。

3.4 盾体结构优化建议

在中等和强岩爆作用下,现有盾体结构设计的盾体强度满足要求,但在极强岩爆作用下,盾体出现大面积塑性变形和局部开裂,因此,需针对极强岩爆工况进行结构优化。盾体局部出现大面积凹陷主要是由局部强度不足所致,可通过增加板厚、提升材料强度等级减少凹陷;盾体两侧变形过大,一方面是由材料强度不够而产生的塑性变形所致;另一方面是因为盾体尾部为悬臂结构,需要较大的抗弯截面来提升自身刚度。因此,提高盾体抗岩爆能力可从以下3个方面考虑:1)盾体外壳和主承力结构使用高强度等级的材料;2)提高盾体尾部结构抗弯截面系数;3)减小盾体尾部悬臂长度。

4 TBM不同等级岩爆防控建议

4.1 工程实例概况

西南地区某铁路是人类历史上地质条件最复杂、建设任务最艰巨的铁路工程,其中隧道工程占比84.43%,且多大量穿越板块活动断裂区域,会遇到岩爆、高压富水与破碎、高应力软硬岩等不良地质岩层。以先期开工的某隧道为例,受强构造应力的影响,在埋深300 m处发生了岩爆灾害,是目前山岭隧道领域发生岩爆灾害的最浅深度,如图16所示。该隧道最大水平主应力为6.81~45.52 MPa,TBM施工标段地层

主要是花岗岩、片麻岩等;隧道有Ⅲ~Ⅵ级围岩,主要以Ⅲ级围岩为主(占施工隧道总里程64.36%)。对不同等级岩爆段长度进行预测可知,该隧道预测岩爆段达23 254 m,占隧道全长的61.25%,其中:中等岩爆段长达12 188 m,占隧道全长32.10%;强烈等级岩爆段长为3 502 m,占隧道全长的9.23%。预测隧道爆坑最大深度比可达1.67,按隧道当量半径5.1 m计算,最大爆坑深度可达3.42 m^[34]。



图 16 埋深 300 m 处轻微岩爆灾害现场
Fig. 16 Site of light rock burst at the buried depth of 300 m

该隧道采用国内自主设计制造的双结构TBM开挖,如图17所示。为解决岩爆冲击下盾尾大面积塑性变形和局部开裂影响钢筋排储藏空间的问题,在敞开式TBM基础上,建立了常规地质“网-喷-锚”敞开支护与岩爆、断层破碎地质“钢管片-辅推”封闭支护的双结构支护体系,降低了盾尾岩爆区域的裸露风险,在一定程度上解决了强岩爆地质中TBM施工防护能力差、安全风险高的难题,加强了TBM对强岩爆地质的适应性。

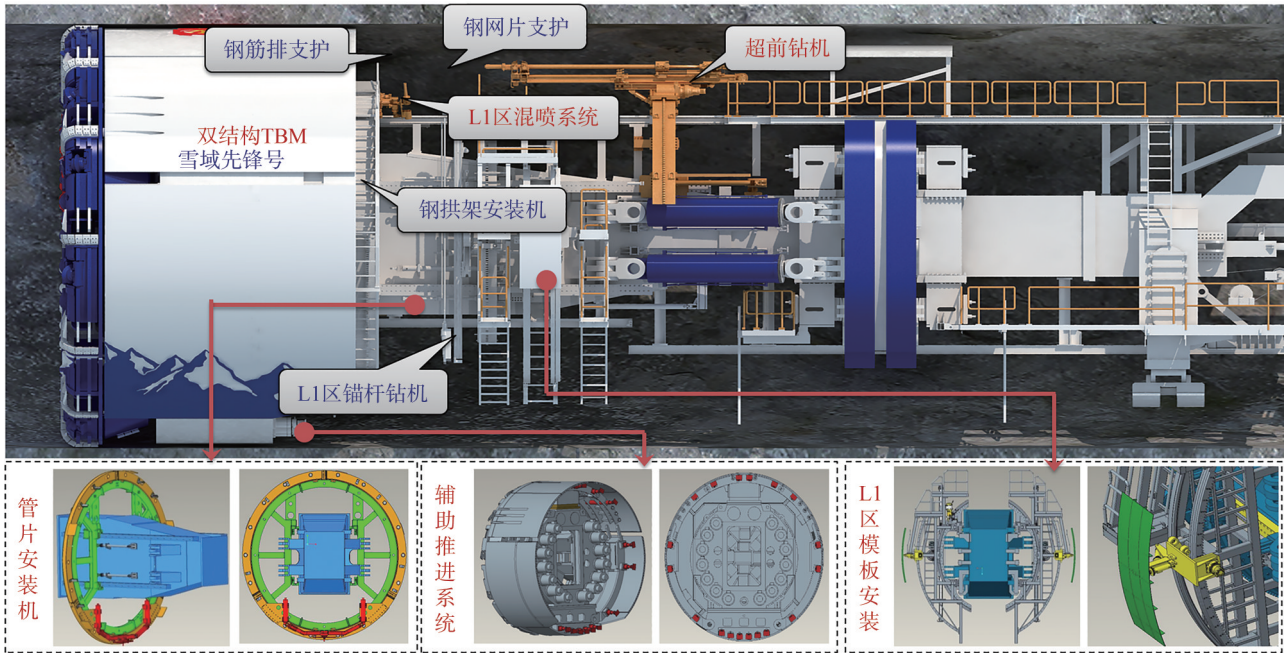


图 17 双结构 TBM
Fig. 17 Dual structure TBM

4.2 不同等级岩爆应对措施

对于敞开式TBM,护盾能否抵抗岩爆的影响至关重要。当护盾有能力抵抗岩爆动态荷载时,岩爆的灾害防控转化为对盾尾的加强支护,高强度锚杆、卸压、拱架筋排、喷浆等主动和被动支护方式都可以为岩爆提供处理的空间。针对不同等级岩爆应对措施如下:

1)轻微岩爆以被动防控理念为主,重点做好盾尾应急混喷封闭围岩,对L1区及时进行锚网支护,做好轻微岩爆围岩的弹射防护。防控的重点是保障人员安全及防止TBM电器件损坏。

2)中等岩爆以被动防控理念为主,本文工程实例使用的TBM强化了钢拱架安装器性能,满足H200钢拱架安装;护盾尾部配有安装钢筋排的存储槽,并增加钢筋排安装范围,即拱顶由120°增加至250°,如图18所示。



图 18 钢筋排存储槽及支护效果

Fig. 18 Reinforcement row storage tank and support effect

3)强烈岩爆采用“被动防控理念为主+主动防控理念为辅”的方式。首先,要加强盾体强度,使护盾自身具备抵抗强岩爆冲击的能力。然后,主动降低掘进速度,以保证80%以上的岩爆发生在主机区域,主机区域以TBM主机作为防护结构。其次,设备于钢拱架操作平台搭载了L1区应急混凝土喷射机械手,如图19所示,可实现圆周方向260°喷浆,围岩一旦露出盾体,即可进行喷浆封闭围岩,降低岩爆扩展。然后,使用抗冲击锚杆和McNally 支护系统做好对盾尾L1区的防护,防止剩余可能发生的20%的滞后岩爆;或将双结构TBM的拱架安装器改装为管片拼装机,以“钢管片+辅助推进”进行盾尾封闭支护,保证对强岩爆地层的掘进效率。

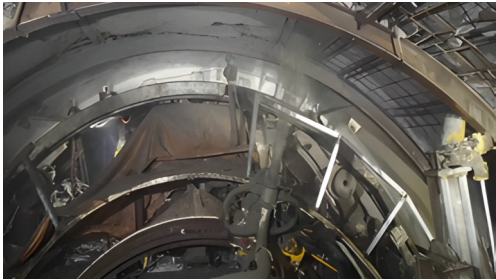


图 19 L1区喷浆机械手现场应用

Fig. 19 Field application of gunite manipulator in area L1

当钢拱架间距减小到可使TBM撑靴跨过时,若更小间距密排无法跨越则可采用混凝土灌注抹平,但会制约掘进效率。另外,如隧道腰线部位发生强岩爆事故,对TBM的掘进也会产生较大影响。因此,为了保证岩爆地层TBM的正常掘进,结合被动防控的理念,可采用双结构TBM的“辅助推进+钢管片”技术通过强岩爆地层,在主机区设置拱架/管片拼装机,使其具备钢拱架及钢管片(或型钢骨架、钢瓦片)拼装功能,如图20所示。

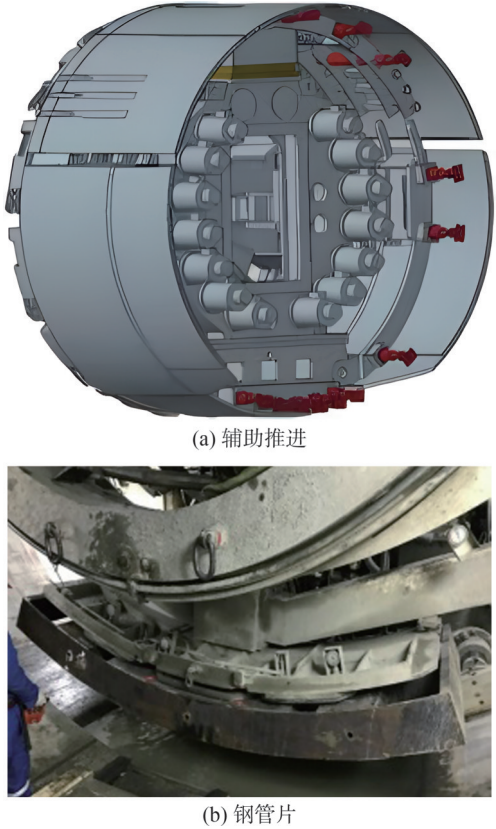


图 20 “辅助推进+钢管片”通过强烈岩爆地层

Fig. 20 Using the “auxiliary propulsion plus steel pipe sheet” method passing through strong rock burst strata

该装置一方面设置有拱架安装所需的撑紧装置,另一方面设置有管片抓举装置,通过齿轮齿圈驱动实现管片回转。在分块盾体周边沿隧道轴线布置多组辅助推进油缸,利用已安装管片提供推进反力,此时主推进油缸

处于随动状态,并不提供推进力。该方案可保证TBM在岩爆地层的掘进效率,并起到全封闭支护的效果。

需要说明的是,上述措施只是岩爆发生以后的被动防御,并不能避免岩爆的产生,但可以有效地防止受岩爆和高应力影响的岩体从护盾揭露以后破裂扩展,即有效控制住护盾以后出现的“岩爆”。如何防治L1区之前洞段和掌子面的岩爆,进一步根据TBM设备和结构特征探讨超前降低或解除岩爆高发区围岩能量水平,是众多学者的研究重点。

4)极强岩爆要以主动防控理念为主。在现有TBM无法进行高效超前应力释放且先导洞法不是最优解的前提下,建议采用钻爆法导洞通过极强岩爆区域。TBM在该区域空推通过时,要重点做好导洞岩柱岩爆防控。

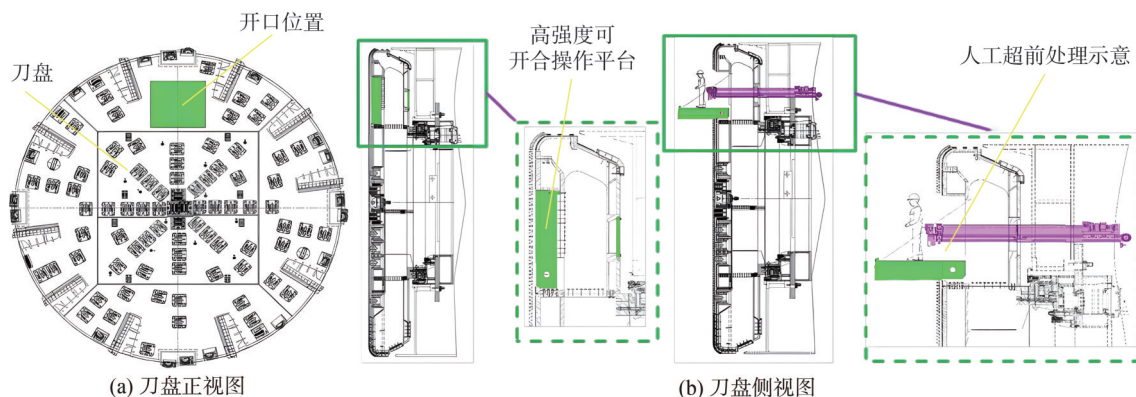


图21 TBM刀盘开口示意图

Fig. 21 Schematic diagram of TBM cutter head opening

5 结论

1)TBM法施工对围岩的损伤破坏程度较低,有利于控制掌子面的稳定性,但由于TBM法在掘进过程中围岩积累弹性的时间更长,发生时滞型岩爆的概率更高。此外,受限于TBM自身设备空间狭小,很难在岩爆发生前实施有效的干预。

2)利用动力学仿真软件分析了盾体在不同岩爆等级下的结构受力和变形特征,并与实际盾体变形进行对比,验证了数值模拟方法的合理性;依据计算结果,可通过加强盾体外壳和主承力结构强度、提高盾体尾部结构抗弯截面系数、减小盾体尾部悬臂长度等方法提高TBM主机区域的抗岩爆能力。

3)在轻微和中等岩爆地层中,TBM护盾具备一定的防御能力,可以采取以被动防护为主的控制策略,将对TBM的支护转化为对盾尾破碎带的加强支护,支护方案以钢筋排和拱架联合支护为主;在强烈岩爆地层中,采用“被动防控理念为主+主动防控理念为辅”的控制策略,支护方式以钢筋排和密集拱架联合支护为主,还可采用双结构TBM的“钢管片+辅助推进”技

4.3 极强岩爆TBM防控探讨

TBM开挖方式严重制约了岩爆的处治手段,可选择余地受到很大的限制,目前,国际上还没有仅依赖TBM自身能力解决极强岩爆问题的先例。因此,解决问题需跳出TBM自身能力的限制。首先,需要在加强TBM抗冲击强度的基础上,研发具备掌子面超前处理能力的TBM,可考虑研发具备开口能力的刀盘,如图21所示,在传统刀盘的基础上,集成高强度可开合操作平台。在掌子面前方一定范围内使用钻爆法人工超前处理,实现TBM法和钻爆法的深度融合,提高TBM超前处理的便捷性和对复杂地层的适应能力。其次,结合“辅助推进+钢管片”进行封闭掘进,并在钢管片预留孔隙安装吸能锚杆,保障隧洞稳定。

术通过强岩爆地层;在极强岩爆地层中,应考虑主动防护理念,亟需研发具备掌子面超前处理能力的TBM。

本文提出针对不同等级岩爆的防控措施,并初步探索了TBM通过极强岩爆地层的可行性方法,但仍有大量工作亟待完善和开展。随着科技进步和工程实践经验的积累,未来TBM岩爆防控工作将在技术创新、预测预警、施工方法、处理措施和安全管理等多个层面取得突破性进展,确保地下工程建设的安全、高效、可持续发展。

参考文献:

- [1] Hong Kairong, Du Yanliang, Chen Kui, et al. Full-face tunnel boring machines(shields/TBMs) in China:History, achievements, and prospects[J]. Tunnel Construction, 2022, 42(5): 739-756. [洪开荣, 杜彦良, 陈馈, 等. 中国全断面隧道掘进机发展历程、成就及展望[J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(5): 739-756.]
- [2] Qi Mengxue. Development, current status, and prospects of TBM tunneling technology in China[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(11): 1964-1979. [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.]

- [3] Wu Shiyong, Wang Ge. Challenge issues in construction and project of large-scale deep-buried tunnel group of Jinping II hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(11): 2161–2171. [吴世勇, 王鹤. 锦屏二级水电站深埋长隧洞群的建设和工程中的挑战性问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(11): 2161–2171.]
- [4] Du Lijie, Hong Kairong, Wang Jiaying, et al. Rockburst characteristics and prevention and control technologies for tunnel boring machine construction of deep-buried tunnels[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(1): 1–15. [杜立杰, 洪开荣, 王佳兴, 等. 深埋隧道TBM施工岩爆特征规律与防控技术[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(1): 1–15.]
- [5] He Manchao, Cheng Tai, Qiao Yafei, et al. A review of rockburst: Experiments, theories, and simulations[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2023, 15(5): 1312–1353.
- [6] Zhang Wenlong, Ma Nianjie, Ma Ji, et al. Mechanism of rock burst revealed by numerical simulation and energy calculation[J]. Shock and Vibration, 2020, 2020: 8862849.
- [7] Voza A, Valguarnera L, Marrazzo R, et al. A new in situ test for the assessment of the rock-burst alarm threshold during tunnelling[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56(3): 1645–1661.
- [8] Feng Xiating, Chen Bingrui, Ming Huajun, et al. Evolution law and mechanism of rockbursts in deep tunnels: Immediate rockburst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(3): 433–444. [冯夏庭, 陈炳瑞, 明华军, 等. 深埋隧洞岩爆孕育规律与机制: 即时型岩爆[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(3): 433–444.]
- [9] Chen Bingrui, Feng Xiating, Ming Huajun, et al. Evolution law and mechanism of rockburst in deep tunnel: Time delayed rockburst[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(3): 561–569. [陈炳瑞, 冯夏庭, 明华军, 等. 深埋隧洞岩爆孕育规律与机制: 时滞型岩爆[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(3): 561–569.]
- [10] Qian Qihu. Definition, mechanism, classification and quantitative forecast model for rockburst and pressure bump[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(1): 1–6. [钱七虎. 岩爆、冲击地压的定义、机制、分类及其定量预测模型[J]. 岩土力学, 2014, 35(1): 1–6.]
- [11] Qian Qihu. Challenges faced by underground projects construction safety and countermeasures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(10): 1945–1956. [钱七虎. 地下工程建设安全面临的挑战与对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(10): 1945–1956.]
- [12] Zhou Qingchun, Li Haibo, Yang Chunhe. Review of evaluation of rockburst and hazard in underground engineering[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(S2): 669–673. [周青春, 李海波, 杨春和. 地下工程岩爆及其风险评估综述[J]. 岩土力学, 2003, 24(S2): 669–673.]
- [13] Xue Yadong, Tian Hengjiao, He Benguo. Research on the mechanism of strain rockburst based on strength and energy theory[J]. Journal of Engineering Geology, 2025, 33(2): 471–481. [薛亚东, 田恒蛟, 何本国. 基于强度和能量理论的应变型岩爆机理研究[J]. 工程地质学报, 2025, 33(2): 471–481.]
- [14] Yan Peng, Chen Tuo, Lu Wenbo, et al. A review of dynamic mechanism and controlling of rockburst[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2018, 51(1): 1–14. [严鹏, 陈拓, 卢文波, 等. 岩爆动力学机理及其控制研究进展[J]. 武汉大学学报(工学版), 2018, 51(1): 1–14.]
- [15] Wang Ke. Overview of state-of-art of rockburst prediction and prevention techniques for deep-buried tunnels[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(2): 212–224. [汪珂. 深埋隧道岩爆预测及防治技术现状综述[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(2): 212–224.]
- [16] Wang Kezhong, Li Sheng, Cao Li, et al. Mechanism and effects of rockburst active control in deep tunnels[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2024, 64(7): 1157–1167. [王克忠, 李胜, 曹立, 等. 深埋隧洞岩爆主动防控作用机制与效果[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2024, 64(7): 1157–1167.]
- [17] Zhao Yong, Tian Yuan, Chang Shuaipeng, et al. Comprehensive prevention and control technology for instantaneous rock bursts in deep-buried drilling and blasting tunnels in plateau areas and its application[J]. Tunnel Construction, 2024(12): 2293–2306. [赵勇, 田源, 常帅鹏, 等. 高原深埋钻爆隧道即时型岩爆综合防控技术及应用[J]. 隧道建设(中英文), 2024(12): 2293–2306.]
- [18] Chen Xiangrong, Liu Ning, Pan Yibin, et al. Researches on rock burst mechanism and engineering prevention measures of deep buried tunnel[J]. Water Power, 2015, 41(11): 67–70. [陈祥荣, 刘宁, 潘益斌, 等. 深埋隧洞岩爆孕育机理及防控措施[J]. 水力发电, 2015, 41(11): 67–70.]
- [19] Zhang Peng, Zeng Xinhua, Li Xianchen, et al. Study on comprehensive measures for control of heavy rockburst during construction of diversion tunnel for Jinping Hydropower Station II[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2011, 42(3): 61–65. [张鹏, 曾新华, 李现臣, 等. 锦屏二级水电站引水隧洞工程强岩爆综合防治措施研究[J]. 水利水电技术, 2011, 42(3): 61–65.]
- [20] Xiao Yaxun, Feng Xiating, Chen Bingrui, et al. Rockburst risk of tunnel boring machine part-pilot excavation in very strong rockburst section of deep hard tunnel[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(10): 3111–3118. [肖亚勋, 冯夏庭, 陈炳瑞, 等. 深埋隧洞极强岩爆段隧道掘进机半导洞掘进岩爆风险研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(10): 3111–3118.]
- [21] Li Mingchuan, Li Shaojun, Xiao Yaxun, et al. Rockburst monitoring and dynamic prevention of enlarging excavation in deep underground laboratory[J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 30(3): 751–759. [李名川, 李邵军, 肖亚勋, 等. 深部地下实验室扩挖岩爆监测与动态防控技

- 术研究[J].工程地质学报,2022,30(3):751–759.]
- [22] Zhao Zhouneng, Feng Xiating, Xiao Yaxun, et al. Microseismic characteristics and rockburst risk of deep tunnel constructed by different excavation methods[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(5): 867–876. [赵周能, 冯夏庭, 肖亚勋, 等. 不同开挖方式下深埋隧洞微震特性与岩爆风险分析[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(5): 867–876.]
- [23] Feng Xiating, Xiao Yaxun, Feng Guangliang, et al. Study on the development process of rockbursts[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(4): 649–673. [冯夏庭, 肖亚勋, 丰光亮, 等. 岩爆孕育过程研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(4): 649–673.]
- [24] Zha Ersheng, Zhang Zetian, Zhang Ru, et al. Long-term mechanical and acoustic emission characteristics of creep in deeply buried Jinping marble considering excavation disturbance[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 139: 104603.
- [25] Jin Xiaoguang, Li Xiaohong, Ai Jiren, et al. Numerical modeling of in situ stress and surrounding rock displacement of deep-long tunnel[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2004, 31(1): 40–43. [靳晓光, 李晓红, 艾吉人, 等. 某深埋长隧地应力演化及围岩应力位移模拟研究[J]. 水文地质工程地质, 2004, 31(1): 40–43.]
- [26] Eberhardt E. Numerical modelling of three-dimension stress rotation ahead of an advancing tunnel face[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2001, 38(4): 499–518.
- [27] Liu Ning, Zhang Chunsheng, Chen Xiangrong, et al. Monitoring and characteristics study of stress evolution of surrounding rock during deep tunnel excavation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(9): 1729–1737. [刘宁, 张春生, 陈祥荣, 等. 深埋隧洞开挖围岩应力演化过程监测及特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(9): 1729–1737.]
- [28] Cheng Li. Application of acoustic test in surrounding rock relaxation tests in a diversion tunnel[J]. Site Investigation Science and Technology, 2015(1): 59–61. [程立. 声波测试在某引水隧洞围岩松弛测试中的应用[J]. 勘察科学技术, 2015(1): 59–61.]
- [29] 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. [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.]
- [30] Dou Linming, Zhou Kunyou, Song Shikang, et al. Occurrence mechanism, monitoring and prevention technology of rockburst in coal mines[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(4): 917–932. [窦林名, 周坤友, 宋士康, 等. 煤矿冲击矿压机理、监测预警及防控技术研究[J]. 工程地质学报, 2021, 29(4): 917–932.]
- [31] Wu Shiyong, Zhou Jifang, Chen Bingrui, et al. Effect of excavation schemes of TBM on risk of rock burst of long tunnels at Jinping II hydropower station[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(4): 728–734. [吴世勇, 周济芳, 陈炳瑞, 等. 锦屏二级水电站引水隧洞TBM开挖方案对岩爆风险影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(4): 728–734.]
- [32] Ouyang Lin, Zhang Rujiu, Liu Yaoru, et al. Review on rockburst prevention techniques and typical applications in deep tunnels[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2022, 39(12): 161–170. [欧阳林, 张如九, 刘耀儒, 等. 深埋隧洞岩爆防控技术及典型工程应用现状综述[J]. 长江科学院院报, 2022, 39(12): 161–170.]
- [33] Xue Jingpei. Construction technology of open TBM safely and rapidly pass through strong rockburst formation of Lingnan section on Qinling tunnel of Hanjiang River—Weihe River water conveyance project[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(6): 989–997. [薛景沛. 敞开式TBM安全快速通过隧洞强岩爆地层施工技术——以引汉济渭工程秦岭隧洞岭南TBM施工段为例[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(6): 989–997.]
- [34] Tian Chaoyang, Lan Hengxing, Zhang Ning, et al. Quantitative prediction of rockburst risk in Sejila tunnel of one railway[J]. Journal of Engineering Geology, 2022, 30(3): 621–634. [田朝阳, 兰恒星, 张宁, 等. 某交通线路色季拉山隧道高地应力岩爆风险定量预测研究[J]. 工程地质学报, 2022, 30(3): 621–634.]

Prevention and Control Method of Rock Burst Strata and Shock Resistance of Shield with TBM in Deep Buried High Stress Tunnels

LU Yiqiang¹, HE Fei¹, WANG Mingyao¹, XING Yunbo¹, LIAO Jianxing², FENG Huanhuan³, MA Tianhui⁴

(1. China Railway Engineering Equipment Group Co., Ltd., Zhengzhou 450016, China;

2. College of Civil Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China;

3. China Railway Tunnel Group Co., Ltd., Guangzhou 511457, China;

4. School of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract:

Objective In order to study the rock burst prevention and control method of open TBM in deep-buried high-stress tunnels and solve the problem of high risk and low efficiency of open TBM construction in rock burst strata, the coping techniques of open TBM in different strata of rock burst

were analyzed. Based on the numerical analysis of the TBM shield against rock burst, the simplified basis of the model and the principle of determining the calculation boundary were proposed, which provided a reference for the simulation calculation of the TBM shield against rock burst.

Methods The commonly used 10 m level open TBM was selected as the research object, and the dynamic simulation software was used to analyze the structural stress and structural deformation characteristics of the top shield under three levels of medium rock burst, strong rock burst, and extremely strong rock burst. In terms of model simplification, the rock block parameters under three rock burst levels were determined according to the existing research results, including rock block shape, rock block size, rock block ejection velocity, and rock block number. For conservative considerations, the simulation calculation assumed that a rock burst occurred above the entire top shield area, and the velocity direction of the rock blocks generated was along the radial direction of the shield. For the sake of simplifying the calculation, only one layer of rock blocks was calculated. In terms of the calculation boundary, the influence of the side shield and the advanced detection device on the top shield was ignored. Assuming that the jacking cylinder was locked, the connecting hole between the jacking cylinder and the top shield was constrained, and the changes of rock block characteristics were not considered, a rigid constraint was imposed on the rock. In addition, relying on a railway tunnel project in Southwest China, this paper summarizes and analyzes the prevention and control methods for different levels of rock burst in the construction process of dual-structure TBM, and puts forward the coping technology of TBM in different levels of rock burst strata.

Results and Discussions According to the numerical simulation results, the structural stress and deformation characteristics of the shield under different levels of rock burst were analyzed. The conclusions were as follows: 1) the maximum impact force borne by the shield under the three levels of rock burst was 4 998 kN for medium rock burst, 16 564 kN for strong rock burst, and 70 106 kN for extremely strong rock burst; 2) The maximum impact force borne by a single jacking cylinder was 5 618 kN for medium rock burst, 11 293 kN for strong rock burst, and 18 873 kN for extremely strong rock burst; 3) The maximum deformation of the top shield was 15.2 mm for medium rock burst, 18.6 mm for strong rock burst, and 77.3 mm for extremely strong rock burst. The maximum deformation was located on both sides of the tail of the top shield, which was similar to the deformation of the top shield under actual site rock burst; 4) The maximum effective plastic strain of the shield structure was 0.03 for medium rock burst, 0.13 for strong rock burst, and 0.36 for extremely strong rock burst, indicating that large-area plastic and local cracking occurred in the shield structure under the action of extremely strong rock burst, which might affect the storage space of steel bars. Through the summary and analysis of the prevention and control method for different levels of rock burst in the construction process of dual-structure TBM, the coping strategies for different levels of rock burst were put forward: 1) passive prevention and control concept was the main idea for light rock burst and medium rock burst; 2) In strong rock burst strata, the control strategy of passive prevention and control concept plus active prevention and control concept was adopted. The surrounding rock was sealed by shotcreting in time to reduce the expansion of rock burst, and the L1 area at the shield tail was protected by impact-resistant anchor rods and the McNally support system. The “steel pipe sheet plus auxiliary propulsion” method could also be used to pass through strong rock burst strata; 3) Active prevention and control concept should be given priority in extremely strong rock burst formation. If the existing TBM was unable to carry out efficient advanced stress relief and the pilot tunnel method was not the optimal solution, it was recommended to use the drilling and blasting method to pilot the tunnel through the extremely strong rock burst area. For the prevention and control of TBM under the condition of extremely strong rock burst, it was proposed to develop a TBM with the ability of tunnel face advanced processing, so as to improve the adaptability of TBM to complex rock burst strata.

Conclusions Through the anti-rock burst simulation analysis of the top shield, the impact force of different levels of rock burst on the shield and jacking cylinder was obtained. The reliability of the numerical simulation method was verified by comparing the simulation deformation results with the actual shield deformation on site. According to the calculation results, the rock burst resistance of the TBM host area can be improved by strengthening the strength of the shield shell and main bearing structure, improving the bending section coefficient of the shield tail structure, and reducing the cantilever length of the shield tail. In the light and medium rock burst strata, the control strategy of passive protection can be adopted. In the strong rock burst strata, the control strategy of passive prevention and control concept, plus active prevention and control concept, should be adopted. In the extremely strong rock burst strata, the concept of active prevention and control should be considered, and it is urgent to develop a TBM with the advanced processing ability of the tunnel face. This paper describes the prevention and control methods of different levels of rock burst, and puts forward the calculation method of the top shield against rock burst, which can provide some reference for the formulation of disposal measures when the TBM passes through rock burst strata.

Key words: rock burst; drilling and blasting method; TBM method; prevention and control concepts; prevention and control techniques; top shield; numerical simulation

(编辑 李轶楠)

引用格式: 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. [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.]