



TBM在煤矿巷道掘进中的技术应用和研究进展

刘泉声 黄兴 潘玉丛 刘滨 邓鹏海

引用本文:

刘泉声, 黄兴, 潘玉丛, 等. TBM在煤矿巷道掘进中的技术应用和研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 242–259.
LIU Quansheng, HUANG Xing, PAN Yucong. Application and research progress of TBM tunneling in coal mine roadway[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 242–259.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-2253>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

煤矿微型TBM及其掘进瓦斯治理巷道工程实践

Coal mine micro TBM and its applications on excavation of coal seam gases drainage roadways

煤炭科学技术. 2023, 51(S1): 104–111 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.mcq22-0918>

煤矿岩巷TBM适应性与新技术发展

Application of TBM in coal mine adaptability type selection analysis and new technology development

煤炭科学技术. 2023, 51(S1): 351–361 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1404>

云贵地区煤矿 T B M 施工技术应用研究

Study on application of TBM construction technology in coal mine construction in Yunnan–Guizhou area

煤炭科学技术. 2022, 50(10): 10–18 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/8a8b4730-b608-40f5-9523-71910c33a704>

瓦斯治理巷小直径TBM刀盘设计研究

Research on design of small diameter TBM cutterhead in gas control roadway of Well 1 Bailongshan Coal Mine

煤炭科学技术. 2023, 51(S2): 306–315 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1706>

我国煤矿岩巷爆破掘进发展历程与新技术研究进展

Development history and new technology research progress of rock roadway blasting excavation in coal mines in China

煤炭科学技术. 2023, 51(1): 224–241 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2022-1804>

煤矿掘进机井下巷道环境建模与障碍检测方法研究

Research on environmental modeling and obstacle detection method for underground roadway of coal mine tunneling machine

煤炭科学技术. 2020, 48(11): 12–18 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/c76f3a80-21d9-4704-a53c-0dfb97824593>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

刘泉声, 黄 兴, 潘玉丛, 等. TBM 在煤矿巷道掘进中的技术应用和研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(1): 242-259.

LIU Quansheng, HUANG Xing, PAN Yucong, *et al.* Application and research progress of TBM tunneling in coal mine roadway[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(1): 242-259.

TBM 在煤矿巷道掘进中的技术应用和研究进展

刘泉声^{1,2}, 黄 兴³, 潘玉丛^{1,2}, 刘 滨³, 邓鹏海^{1,2}

(1. 武汉大学 土木建筑工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 武汉大学 岩土与结构工程安全湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430072; 3. 中国科学院武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

摘 要: TBM 工法经济技术优势显著, 正成为煤矿巷道快速掘进的一种新方法。但由于煤矿特殊的施工环境和复杂地质条件, TBM 在煤矿巷道掘进中面临以下技术挑战: ①煤矿特殊施工环境下 TBM 装备和矿井系统适应性设计难; ②煤系软硬复合地层破岩机理不清, 高效破岩控制难度大; ③软弱地层挤压变形卡机灾害风险大, 灾害预测和安全控制难度大; ④掘进空间狭小和粉尘水雾干扰严重, TBM 掘进过程监测难度大, 难以进行掘进参数决策控制和灾害预警。对此, 针对 TBM 装备适应性设计技术, 深部复合地层 TBM 高效破岩理论, 挤压变形卡机灾害预测控制方法, 掘进过程智能化决策控制技术等开展了系统研究, 在 TBM 安全高效掘进技术方面取得了以下研究进展: ①论述了针对煤矿特殊施工环境的 TBM 装备和施工工艺适应性设计技术; ②开展了 TBM 滚刀贯入和线性切割试验, 揭示了复合地层地应力水平、岩石强度及岩性变化、掘进控制模式、滚刀安装半径等对 TBM 破岩效率和破岩模式的影响机理, 提出了深部复合地层 TBM 掘进性能评价预测方法和岩体可掘性评价方法; ③揭示了深部煤系软弱地层 TBM 掘进挤压大变形卡机灾害孕育发生机理, 发展了挤压变形卡机灾害孕育演化及控制过程模拟预测的 FDEM(有限元-离散元耦合)方法, 提出了挤压变形卡机监测预警方法, 形成了 TBM 掘进挤压大变形卡机“大变径扩挖、掘进参数优化和分步联合支护”综合防控技术体系; ④提出了 TBM 掘进过程岩-机作用信息(刀盘刀具-掘进工作面作用、围岩-护盾作用信息)实时感知技术, 初步提出了 TBM 掘进参数自适应智能决策方法。上述研究进展将推动 TBM 在煤矿巷道建设中的应用和安全高效掘进技术进步。

关键词: TBM; 煤矿巷道; 适应性设计; 高效破岩; 挤压变形卡机灾害; 分步联合控制; 掘进参数智能决策与控制

中图分类号: TD421

文献标志码: A

文章编号: 0253-2336(2023)01-0242-18

Application and research progress of TBM tunneling in coal mine roadway

LIU Quansheng^{1,2}, HUANG Xing³, PAN Yucong^{1,2}, LIU Bin³, DENG Penghai^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Key Laboratory of Geotechnical and Structural Engineering Safety of Hubei Province, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China)

Abstract: TBM (Full Face Tunnel Boring Machine) tunneling method has significant economic and technical advantages and is becoming an innovative method for deep roadway speedy construction. However, due to the special complex geological conditions and construction environment of coal mines, the technical challenges faced by TBM tunneling in deep roadways and the key scientific problems are analyzed: ① adaptive design of TBM equipment and the mine system under special tunneling environment in coal mine is difficult to fulfill; ② the rock fragmentation mechanism in soft and hard mixed strata is unclear, and the efficient rock cutting is difficult to realize; ③ The

收稿日期: 2022-10-20

责任编辑: 朱恩光

DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-2253

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (U21A20153, 41941018); 湖北省重点研发计划资助项目 (2021BCA133)

作者简介: 刘泉声(1962—), 男, 江苏溧阳人, 教授, 博士生导师。E-mail: liuqs@whu.edu.cn

risk of soft rock squeezing deformation and TBM jamming, and the difficulty for accurate prediction and safety control is large; ④ Due to the narrow tunneling space and the serious interference of dust and water fog, it is difficult to monitor the tunneling process and make decision control and disaster warning according to the monitoring information. In this regard, systematic research on adaptive equipment design, efficient rock cutting in mixed-ground, squeezing deformation and TBM jamming disaster prediction and control method, and intelligent assisted tunneling method in deep composite stratum tunneling has been carried out. Research results on the TBM safe and efficient tunneling technology are achieved: ① the present situation of TBM adaptive design technology for special construction environment of coal mine is illustrated. ② full-size disc cutter penetration and linear cutting tests for hard and soft rock under high confining pressure are performed. Accordingly, the influence of complex geo-stress, rock strength and lithology change, tunneling control mode, cutter installation radius on the TBM cutting efficiency and rock fragmentation mechanism are revealed. The evaluation and prediction method of TBM tunneling performance and the corresponding rock mass classification method in deep mixed ground is put forward. ③ The mechanism of large deformation and TBM jamming disaster during TBM tunneling in deep coal measure soft strata is revealed. The FDEM (combined FEM and DEM) numerical simulation method of large deformation and TBM jamming disaster evolution and corresponding control measures for TBM tunneling in soft rock is developed. The monitoring and warning method of squeezing deformation and TBM jamming disaster is put forward. A comprehensive prevention and control technology system of 'large diameter over excavation, excavation parameter optimization and step by step combined supporting' is proposed for large squeezing deformation and TBM jamming hazard. ④ The real-time sensing technology of rock-TBM interaction information (cutter head - roadway face interaction, surrounding rock-shield interaction) in TBM tunneling process is proposed, and the adaptive intelligent decision-making method for advance parameters is initially developed. The research progresses will promote the application of TBM tunneling in coal mine roadway construction and safe and efficient tunneling technology.

Key words: TBM tunneling; coal mine roadway; adaptive design; efficient rock cutting; large squeezing deformation and TBM jamming disaster; step-by-step combined supporting method; intelligent decision-making and control method for TBM advance parameters

0 引 言

随着煤炭资源需求和开采强度的不断增加,越来越多的煤矿进入深井开采阶段^[1]。我国煤矿巷道掘进量大,深部巷道掘进比例将大幅度提高。然而,煤矿深部围岩的赋存环境与力学行为和浅部有显著差异,正是这种差异导致许多工程事故和灾变现象,造成采掘接续紧张、工程灾害频发,对巷道快速掘进与围岩稳定控制提出了一系列严峻挑战。当前常用的支护措施、施工工艺、巷道断面形状已经远远不能满足控制围岩强烈变形的要求。而现代化大型矿井巷道掘进量大,采掘接续紧张,对巷道掘进速度和运营安全要求高。因此,迫切需要发展一种新的能适应煤矿巷道快速掘进和围岩稳定控制要求的施工方法。

TBM(全断面隧道掘进机, Full Face Rock Tunnel Boring Machine)是目前世界上技术最先进的隧道掘进装备。TBM 集破岩、出渣、排渣、支护等功能于一身,各工序可以协同作业^[2-3],如图 1 所示。与钻爆法相比, TBM 掘进工法具有安全、高效、经济、环保和有利于围岩稳定性控制等优势^[4-5]。因此, TBM 在输水隧洞、交通隧道中得到了广泛应用。例如,兰渝铁路西秦岭隧道采用了 2 台 10.2 m 的 Robbins 敞开式 TBM,隧道长达 28.24 km;国产首台硬

岩 TBM 应用于吉林引松供水工程^[6];新疆 YE 工程共有 23 条 TBM 隧洞组成隧洞群^[7];即将开工建设的引江补汉工程拟采用 9 台超大直径 TBM。鉴于 TBM 在这些隧道工程施工中发挥出的显著施工优势,在煤矿中应用能够发挥减人增效、快速掘进、保障采掘接替的优势^[8]。近年来,陆续有多个矿井开始尝试将 TBM 引入煤矿井巷掘进,例如神东矿区补连塔煤矿斜井、淮南张集矿瓦斯抽采巷、山东新巨龙煤矿二水平北回风大巷、陕西延长石油可可盖煤矿斜井、河南平宝煤业有限公司首山一矿瓦斯低抽巷先后引入 TBM 进行快速掘进,取得了良好的工程效果^[4,9]。TBM 将在煤矿巷道掘进中得到越来越多的应用和推广。

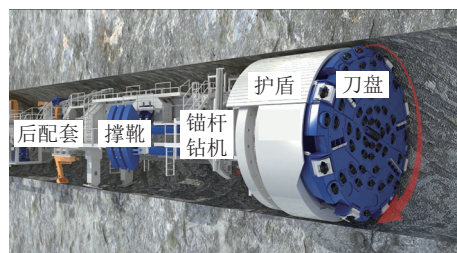


图 1 敞开式 TBM 结构

Fig.1 Structure diagram of gripper TBM

国内外学者 HANDEWITH^[10]、STACK^[11]、ROBBINS^[12]、CIGLA 等^[13]、HOME 和 ASKILSRUD

(2011)^[14]、BROX^[15]和 ZHENG 等^[5]论述了 TBM 在矿井中应用的情况。程桦等^[16]、唐彬等^[17]近年来对 TBM 在巷道掘进中的装备设计、围岩稳定性分析与控制进行了系列研究。然而,煤系地层地质条件和施工环境相比常规交通隧道和引水隧洞更为复杂,而 TBM 对地质条件的适应性相比钻爆法面临更多的挑战,比如煤矿特殊施工环境下 TBM 掘进系统防爆、运输、组装、始发等适应性设计问题,煤系复合地层高效破岩,煤系软弱地层中容易发生挤压大变形卡机灾害,复杂地层 TBM 掘进参数决策控制等,目前还没有对 TBM 在煤矿巷道中的应用进行全面深入的研究,需要开展针对性的技术研发。因此,针对 TBM 在煤矿巷道中的应用现状、技术挑战进行了专题研究,论述了在这些方面取得的研究进展。

1 TBM 在煤矿巷道掘进中应用现状与技术挑战

TBM 已成为煤矿巷道快速掘进的一种新方法,已在国内 20 余座矿井进行了试验应用^[9,18-23]。然而煤矿巷道较水利、铁路隧道所经历的地质构造活动更为剧烈、线路难以选择,具有特有的施工环境和复杂地质条件,除断层破碎带、富水裂隙带和软弱夹层外,主要表现为以下突出特征:

1) 煤矿特有的施工环境。与铁路隧道和输水隧洞不同,煤矿巷道 TBM 处于特殊的施工环境:①煤矿巷道相比常规隧道施工,最大的不同在于设备处于高瓦斯环境;所有在煤矿井下使用的电气设备均应满足煤炭行业安全规程和防爆要求。②常规隧道中 TBM 一般能在洞外组装、步进和调试,具有足够的操作空间;而深井煤矿多采用立井开拓,对于立井巷道 TBM 掘进, TBM 只能分块运输至井下待掘巷

道,在井下组装、拆解需要专门施工大断面组装和拆解硐室,需要对 TBM 进行模块化设计。③调研统计表明,目前 TBM 应用较多的是瓦斯抽采巷和采区大巷,如淮南张集煤矿瓦斯高抽巷、河南平宝煤业首山一矿瓦斯低抽巷,这些巷道经常沿着工作面上下平巷和开切眼布置,掘进过程中常面临小半径转弯问题,给 TBM 姿态控制带来严峻挑战。④目前除了应用于煤矿斜井和平硐的 TBM 直径稍微更大以外,其他用于瓦斯抽采巷、采区巷道的 TBM 直径均较小,通常介于 2.5~5 m,如淮南顾桥煤矿瓦斯抽采巷敞开式 TBM 直径仅 3.5 m,给支护作业、通风除尘和岩渣及材料运输均造成严峻挑战,进而影响 TBM 掘进效率。⑤深部巷道布置密集, TBM 巷道通常位于高应力软弱围岩巷道群中,由于密集布置的巷道分布于大规模松软围岩中,相邻巷道或洞室开挖扰动区和二次应力场相互叠加,对围岩扰动更加严重;而且 TBM 掘进速度快,排渣量大,需要为 TBM 掘进设计专用的排渣运输系统,否则难以发挥出 TBM 快速掘进的优势。因此需要进行矿井开拓系统的优化布置。

2) 煤矿特殊的复杂地质条件。①岩性变化大、结构复杂多变:煤矿岩巷赋存于沉积岩地层,以泥岩、砂质泥岩、粉砂岩及砂岩等为主,有时会穿越煤层。煤系地层地质活动强烈,地层软硬交替出现,结构复杂多变。在巷道开挖断面或开挖纵向方向上,由 2 种或 2 种以上不同地层组成,且这些地层的地质、力学和水文特征差异性大,通常将这种地层称为复合地层^[4,24-25]。泥岩、砂质泥岩都是典型的软岩,与砂岩的硬度、强度、脆性相差较大,深部煤系地层是最为典型的复合地层,如图 2 所示。②地应力高:深部巷道所处地质环境复杂,一般赋存了高地应力,而且围岩侧压力系数通常大于 1,甚至可达 1.6。以淮南

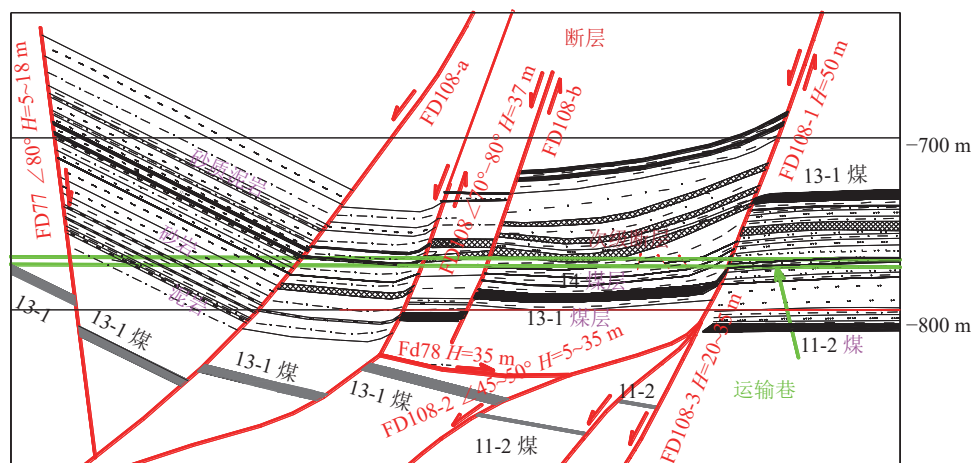


图2 顾桥矿南翼轨道大巷地质剖面^[4]

Fig.2 Geological profile of south rail-transport roadway in Guqiao Coal Mine^[4]

矿区 800~1 000 m 深度为例, 实测地应力结果表明, 最大水平主地应力达 20~36 MPa, 垂直地应力达 20 MPa; 淮南顾桥矿南翼轨道大巷水压致裂法应力测量显示最大水平主应力达到 28 MPa, 侧压力系数达到 1.60; 其他深部煤矿的结果也表明, 最大地应力可达 20 MPa 以上^[26]。由于传统施工方法的开挖和支护难度均随着埋深的增大而增加, 因此 TBM 工法在煤矿深部巷道施工中的优势更加明显。但随着埋深的增加, 受“三高一扰动”(高地应力、高水头压、高地温梯度、开挖扰动)作用, 高地应力与低强度的矛盾突出, 岩石变形破坏问题更加突出。目前对深部巷道围岩的变形破裂机理缺乏深入认识, 浅部巷道掘进的设计理论和施工技术在深部巷道中难以适用。

地质条件是决定 TBM 施工能否成功的最关键因素。通常 TBM 最适宜在较均质的中硬岩地层中掘进, 对不良地质条件的适应性不如钻爆法灵活^[27-28], 常遭遇软弱围岩挤压大变形、断层破碎带坍塌失稳、涌水突泥等事故。例如, 广西天生桥二级水电站引水隧洞采用开敞式 TBM 施工, 但因隧洞沿线溶洞十分发育, 严重影响施工速度, 10 年内累计掘进仅 7.5 km; 昆明掌鸠河引水隧洞采用双护盾 TBM 掘进, 由于隧洞沿线密布小断层, 发生 8 次重大卡机事故, 停机约 1 年, 最后不得不放弃 TBM 改用钻爆法施工, 经济损失至少 1 亿元^[29-30]; 台湾北宜高速公路雪山隧道也因遇到雪山山脉断层与高压涌水, 多次发生隧道坍塌及突涌水灾害, 后改用钻爆法, 比原计划推迟 8 年竣工^[4]。

在煤矿中采用 TBM 掘进目前仍处于探索阶段, 缺乏足够的工程实践经验和技术研发作支撑。由于煤矿特殊的施工环境和深部复杂的地质条件, TBM 掘进面临掘进系统适应性设计、深部复合地层高效破岩、软弱地层挤压变形卡机灾害防控、掘进过程信息感知与决策控制等多重技术挑战, 具体表现如下:

1) 煤矿特殊施工环境下 TBM 掘进系统适应性设计。由于煤矿特殊施工环境, TBM 掘进面临设备系统防爆设计, 适应狭小空间运输、始发组装和接收拆卸的模块化设计, 随着巷道顶底板岩层起伏和小半径转弯的姿态调整控制, 不良地质超前地质预报和超前处理, 专用排渣及矿井开拓系统适应性设计等技术难题: ①煤矿特有的瓦斯环境, 要求必须对 TBM 所有电气设备进行防爆设计。从巷道通风设计、电气管理、瓦斯监测等 3 个方面尽可能减少瓦斯对 TBM 施工安全的影响。②TBM 部件体积大、数量

多、重量大, 其中 TBM 中最大不可拆解件为刀盘和主机驱动系统, 应解决矿井有限空间内 TBM 超大超重部件如何入井的难题, 对下井运输的罐笼、矿车等运输承载能力提出了特殊要求。TBM 设备研制时, 应根据矿井瓦斯地质条件确定设备是采用局部防爆还是整机防爆; 并根据矿井井筒、巷道尺寸和运输设备能力, 确定刀盘、主驱动等超大超重部件尺寸。例如淮南张集矿 TBM 在井下组装用了 4 个月时间。TBM 完成长距离巷道掘进后, 在接收洞室原位拆解也是一大难题, 需要研究相应的原位拆解配套技术。③由于煤矿深部巷道地质条件复杂, 灾害隐患多, 往往需要配备超前探测和超前加固处理的设备, 需要研究在煤矿巷道 TBM 狭小空间内如何布设这些设备。④由于巷道空间有限, 如淮南张集煤矿瓦斯抽采巷 TBM 直径仅有 2.5 m 和 3.5 m, 但煤矿 TBM 掘进排渣量大、支护作业量大、锚杆、钢筋网片尺寸已占据巷道净空的大部分作业空间, 在如此狭小空间内施工, 因此需要研究支护系统、通风除尘设备安装, 出渣皮带机布设及其与矿车出渣系统间的转换, 以及材料辅助运输系统如何布设等问题。必要时需要设计专用的排渣运输系统, 才能满足 TBM 掘进的大量排渣需求, 发挥出 TBM 快速掘进的优势。⑤煤矿巷道经常发生沿煤层顶底板起伏、工作面干切眼处小半径转弯的情况, TBM 掘进面临姿态调整控制的技术难题。⑥由于 TBM 巷道通常处于密集的巷道群中, 为了减少采掘扰动叠加影响, 巷道群的布置、开挖顺序、支护方案及支护参数对巷道的稳定性都有重要影响; 同时需要考虑井筒提升、组装拆解、通风、排渣等需求, 因此, 需要对整个矿井的开拓系统进行适应性设计。

2) 深部复合地层 TBM 高效破岩。深部煤系地层岩体结构复杂多变, 岩性变化剧烈, 软硬复合地层频繁出现(图 3), 对 TBM 高效破岩带来严峻挑战。传统 TBM 主要适用于中硬岩和硬岩地层, 相邻滚刀

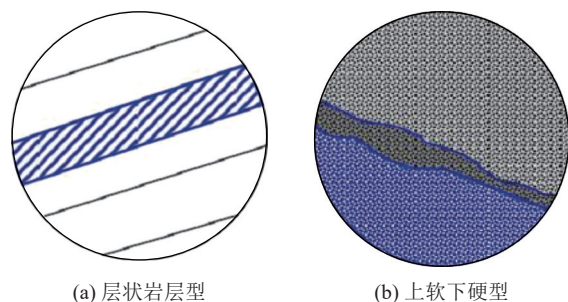
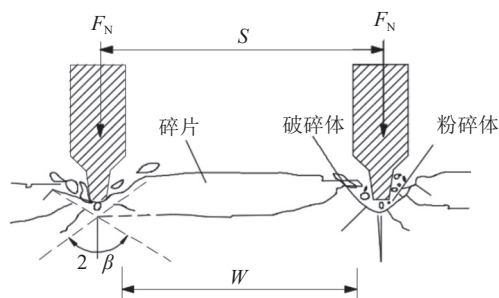


图 3 煤系复合地层 TBM 掘进示意
Fig.3 TBM tunneling in coal measure composite stratum

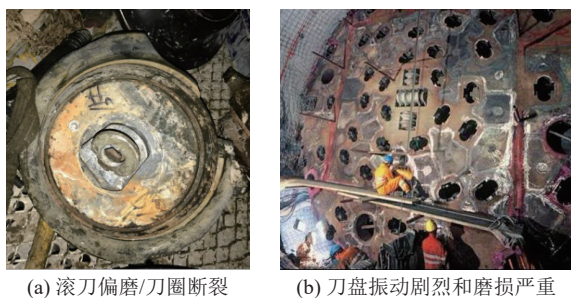
在岩石表面滚压时产生的裂纹交汇形成片裂破坏是 TBM 刀盘刀具主要的破岩机制(图 4)。然而由于煤系地层软硬岩在强度、脆性和矿物成分等方面差异显著,在滚刀作用下裂纹萌生和扩展机制有很大不同, TBM 在煤系地层中掘进,难以获得理想的设备利用率和掘进速度,容易引发一系列问题:①在软弱破碎岩层中刀盘刀具被泥饼包裹,滚刀、轴承易造成偏磨损毁。②在软硬复合地层中,当滚刀从软岩进入硬岩时,瞬间增大的破岩力会对刀体产生冲击作用,刀体在冲击荷载反复作用下会产生疲劳裂纹,导致刀圈脆性断裂,降低滚刀寿命(图 5)。同时,当掘进面软硬不均时,刀盘会产生受力不均现象,导致掘进姿态难以控制,严重时会引起刀盘开裂或变形,损坏主轴承,引发安全问题。因此,亟需研究煤矿深部软硬复合地层 TBM 高效破岩的方法。



F_N —滚刀法向力; S —滚刀间距; β —岩石破碎角的一半;
 W —岩渣宽度。

图 4 TBM 滚刀破岩机理

Fig.4 Rock fragmentation mechanism under TBM cutting



(a) 滚刀偏磨/刀圈断裂

(b) 刀盘振动剧烈和磨损严重

图 5 复合地层中刀盘刀具非正常损坏

Fig.5 Abnormal damage of rolling cutter in complex strata

3)深部软弱地层挤压变形卡机灾害频发。TBM 在深部巷道中往往需要频繁穿越高地应力软弱岩层。而深部软弱地层中的高地应力和岩体软弱结构构成了挤压变形的基本条件^[31]。TBM 开挖扰动改变了岩体初始应力状态,造成围岩发生破裂碎胀破坏而产生强烈挤压变形。并且破裂碎胀后的岩石块体或破碎带内的岩石块体容易垮塌冒落造成卡刀盘甚至掩埋机头,如图 6 所示。如甘肃引洮工程由于围岩挤压变形造成的卡机使得 TBM 被困长达 1 年以上;

青海引大济湟工程遭遇大断层、大埋深复杂地质条件,频繁塌方和严重大变形造成 TBM 经历了 10 余次严重的卡机事故,工程举步维艰,最终在桩号 CH17+000 处被迫中断施工,停滞了 2 年;委内瑞拉 Yacambú Quibor 隧道软弱围岩挤压变形卡机,使得 TBM 完全损毁。事故统计显示挤压变形及其导致的卡机灾害占 TBM 重大事故的 37%^[29],是占比最大的工程灾害,威胁设备和人员安全,导致严重工期延误和巨大经济损失。因此,亟需研究煤矿深部软弱地层挤压变形卡机灾害的孕育发生机理、精准预测方法和综合防控措施。

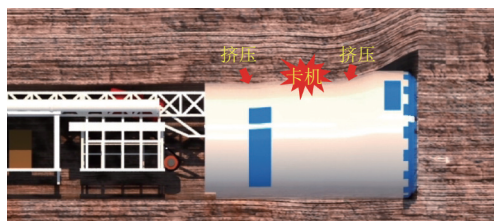


图 6 深部软弱地层 TBM 掘进挤压变形卡机灾害示意

Fig.6 Squeezing deformation and TBM jamming disaster when tunneling in deep and soft ground

4)深部复杂地层 TBM 掘进过程智能化决策控制。在现有 TBM 掘进技术中,由于缺乏足够的岩-机作用信息感知与掘进过程智能决策方法,复杂环境下 TBM 施工面临诸多技术难题^[27-28],主要表现为:①TBM 穿越复合地层破岩效率低、刀盘刀具磨损严重甚至异常损毁、主轴承断裂等(图 5)。②TBM 掘进参数的选择往往依赖人为经验,一旦遭遇地层变化或复杂地质条件难以及时调整掘进参数和控制方案,在不同的工程重复出现类似的工程事故。为了解决上述问题,亟需开展 TBM 掘进过程岩-机相互作用信息实时感知与智能决策控制研究,以实现 TBM 掘进过程的信息化智能化决策控制。TBM 信息化、智能化掘进是 TBM 安全高效掘进的必然发展趋势和未来行业竞争焦点。欧洲地下工程施工战略研究机构已经把“无人值守 TBM 掘进”作为 2030 年的远景目标^[32]。国内外各大研究机构和 TBM 装备制造企业(如德国 Herrenknecht、美国 Robbins、中国中铁工程装备集团和铁建重工集团等)均已着手研究智能化掘进技术^[33]。

2 煤矿巷道 TBM 安全高效掘进技术研究进展

2.1 煤矿特殊施工环境下 TBM 装备适应性设计技术

由于深部巷道 TBM 施工面临设备防爆、大件运输、原位组装拆卸、大量排渣运输、材料辅助运输、矿井开拓系统适应性等难题,首先应进行 TBM 装备

适应性设计与矿井开拓系统适应性设计。对此,我国 20 余座引入 TBM 进行巷道掘进的矿井开展了许多有益的探索和实践。如唐彬等^[16]和程桦等^[19]提出了 TBM 整机模块化、轻量化和紧凑化,各部件轻量化、小型化和设备防爆等设计原则及其技术指标;研发了免焊接高强度分体式刀盘,采用防松螺栓连接(图 7),既满足井下运输安装要求,又避免了井下焊接作业;设计了防爆外壳、喷水刀座、防爆导向系统和嵌入式通风除尘系统,首次实现了 TBM 整机防爆功能(图 8);研发了搭载自动锚杆钻机快速钻进施工技术;形成了井下有限空间内 TBM 运输、组装、拆卸技术(图 9);发展了采用始发油缸完成始发、无需安装始发反力架的 TBM 井下始发、掘进关键技术。此外,深井煤矿中大量岩巷为瓦斯治理巷道和采区系统巷道,属临时或半永久巷道,TBM 巷道通常采用锚杆支护,辅以钢筋网片或喷射混凝土进行支护。然而,由于煤矿 TBM 巷道空间狭小,TBM 装备结构复杂、占据了巷道净断面的大部分空间,因此应将锚注支护施工设备与 TBM 设备相结合,让锚杆支护能

充分发挥效果。在淮南张集煤矿瓦斯抽采巷 TBM 主梁上布设 2 台锚杆钻机分别负责左、右帮部和顶板锚杆施工,可同时施工锚杆孔,彼此独立、互不干扰。完成锚杆孔施工后,依次(挂网)安装锚杆。锚杆机可沿环形轨道滑动,同时可绕锚杆机座旋转,锚杆安装角控制在 75° 以上,现场施工中,如果锚杆钻机无法实现设计的锚杆安装角度,在主梁两侧设有可折叠锚杆机操作平台及配套风水管路接口,可根据现场需要增设锚杆钻机,以增加锚杆安装的灵活性。该技术成功应用于淮南张集煤矿西二采区 1413A 采煤工作面高抽巷,与施工工序优化配合,创造了国内煤矿深井岩石巷道 TBM 掘进 30.7 m 日进尺记录。

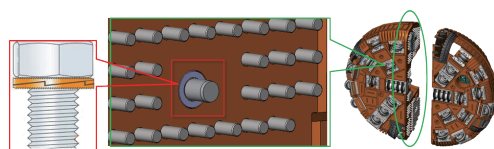


图 7 采用免焊接螺栓的分体式刀盘适应性设计
Fig.7 Adaptive design of split cutter-head using bolts without welding

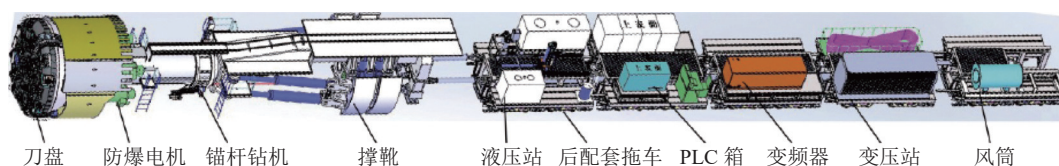


图 8 QJYC045M 型煤矿全断面硬岩掘进机
Fig.8 QJYC045M coal mine hard rock TBM

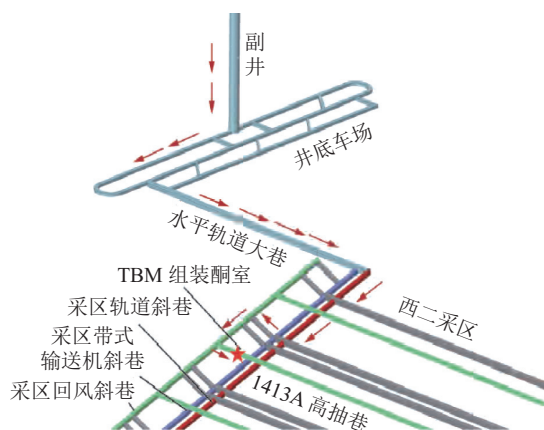


图 9 全断面掘进机井下运输路线
Fig.9 Underground transporting route of TBM

神华神东补连塔矿 2 号副井采用了中国铁建重工集团研发的长距离大坡度斜井 TBM^[4]。该 TBM 针对煤矿特殊施工环境,进行了设备防爆设计,具备大流量通风除尘、长距离反坡排水、长距离重载物料运输、有害气体检测报警与系统联动控制等功能;针

对长距离、大坡度斜井安全性和耐久性设计难题,研究提出了限压排放的差异性防水结构、能适应地层变形的管片衬砌结构等设计方法,通过实施斜井管片壁后分区域分类型注浆等技术方案,解决了长距离、连续下坡、上穿下跨既有巷道、掘进泥质砂岩、多次穿越煤层、高压富水等六大技术难题,创下了最高月进尺 639 m 世界纪录和连续 4 个月月进尺超过 500 m 的良好业绩。

山东新巨龙煤矿研发了大断面岩巷 TBM 智能掘进系统(“新矿 1 号”),集成了掘进、出渣、支护、除尘、通风、降温、导向、防爆、防冲等技术于一体^[20]。TBM 采用分体模块化设计,提出了大尺寸部件入罐与出罐技术、超重超大刀盘整体旋转及吊装技术,满足了大尺寸部件立井下送和井下运输。此外,为了实现锚杆垂直于巷道岩面打设的要求,提出了主梁下置设计方案,将主梁整体翻转采用下置主梁结构,上部留有大的锚杆支护操作空间,满足一次性施打长度 2.5 m 的锚杆,解决了在煤矿巷道狭小空

间 TBM 掘进中施作高质量锚杆支护的技术难题。同时优化了曲线转弯施工工艺,将掘进循环进度由 1.4 m 缩小至 0.8 m;采用及时永久支护,减小空顶面积;优化巷道支护工艺,优化指形护盾使用工艺,降低顶护盾、左上护盾、右上护盾、侧护盾对巷帮的支撑,进行撤架前移;并充分利用惯性导航系统进行 TBM 姿态调整,保证曲线转弯段平稳度过。

河南平宝煤业首山一矿瓦斯低抽巷直径 4.33 m TBM 需要经历多个小半径(40 m)转弯曲线段,中铁装备对此进行了小半径转弯出渣系统设计。此外,针对穿越断层破碎带面临围岩失稳及突涌水问题,进行了超前探测系统设计,首次采用智能锚杆支护设备实现组合式支护系统设计。陕西延长石油可盖煤矿斜井 TBM 穿过富水弱胶结的 63 m 厚松散层、20 m 厚洛河组强风化段,对此专门配备了超前管棚支护及注浆系统、钢筋排架支护系统,搭载了超前探测钻机,辅以三维地震波法、三维激发极化法等超前地质预报系统^[22],实现不良地质体的超前探测和处理。

这些煤矿在引进 TBM 时进行了设备适应性的系统改进,为 TBM 应用于煤矿巷道掘进积累了宝贵经验。

2.2 深部复合地层 TBM 高效破岩机理与可掘性评价方法

由于现有的 TBM 刀盘适应性设计理论并非针对煤矿巷道掘进的煤系地层提出的,为解决 TBM 在煤矿深部复合地层中的掘进效率和安全性问题,必须开展 TBM 刀具破岩机理研究,尤其是重点研究复合地层软硬界面和软弱岩层的破岩机制,提出适用于煤矿软岩和复合地层的滚刀破岩力计算模型,分析各种工况下刀盘受力变化规律,为深部复合地层 TBM 刀盘刀具配置提供理论依据和相关参数,提出岩体可掘性评价理论,以保证 TBM 在煤矿深部软岩及软硬岩复合地层中的破岩效率。

现有 TBM 滚刀破岩试验大多针对无围压条件下的单滚刀破岩模式进行^[34-35],不能考虑煤矿深部巷道高地应力和软硬岩地层交替出现的地质条件,也不能考虑滚刀安装半径和掘进控制模式等因素的影响,因此不能全面揭示煤矿深部高地应力软硬复合地层 TBM 刀盘全断面多刀具组合破岩机理。对此,针对深部高地应力条件,研发了高围压 TBM 破岩机理试验平台,开展了高围压条件下针对软硬岩的全尺寸滚刀线性切割和回转破岩试验,能够真实模拟煤矿深部巷道掌子面上的高地应力、复合岩体

结构和刀盘刀具破岩状态,首次揭示了软硬地层剧烈变化、深部高地应力、掘进控制模式、滚刀安装半径对 TBM 破岩机理和效率的影响规律^[36-37]。①随着岩石强度增加滚刀破岩模式由延性剪切向脆性拉断转变:软岩破坏受多条剪切裂纹控制,硬岩破坏受少数拉伸裂纹控制。②随着围压(对应掘进工作面上的地应力)增加,由低围压抑制破岩向高围压促进破岩转化(图 10)。③推力控制模式下破岩效率高于贯入度控制模式。④岩体可掘性指数随滚刀在刀盘上安装半径的增大而降低(图 11)。⑤滚刀破岩力随节理间距的增加而增加;节理倾角 $<30^{\circ}$ 时,破岩效率随节理倾角的增加而增加。成果为煤矿深部巷道复合地层 TBM 刀盘刀具选型配置和适应性设计奠定了理论基础。

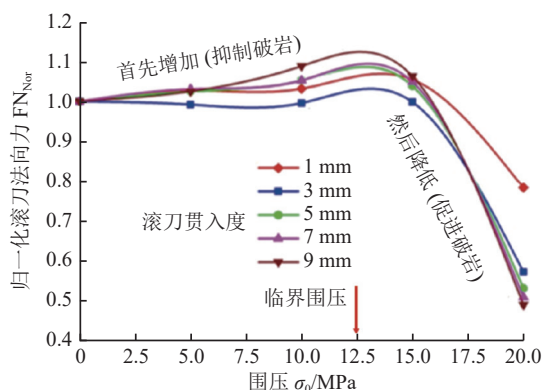


图 10 围压对破岩效率的影响规律

Fig.10 Influence law of confining pressure on rock cutting efficiency

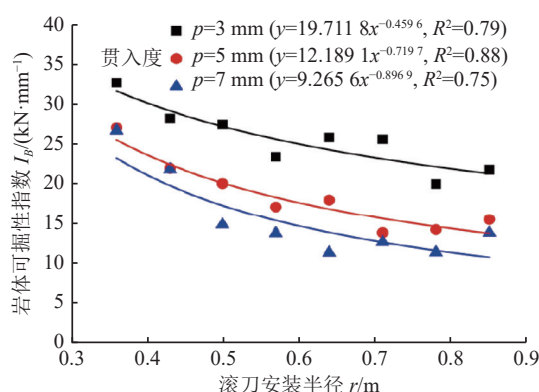


图 11 岩体可掘性指数随滚刀安装半径的变化规律

Fig.11 Variation law of rock mass boreability index with cutter installation radius

现有 TBM 装机主参数和掘进性能预测模型大都针对浅埋、性质比较单一的中硬岩和硬岩地层掘进的 TBM 开发的^[38-39],常用的岩体分级方法大多也是针对浅埋的、性质比较单一的钻爆法施工地层开

发的,不能考虑煤矿深部复杂地应力状态、复杂岩体结构特征和 TBM 巷道独有施工特点。因此,改进了由现场贯入度指数(FPI)表征的岩体可掘性预测模型(式(1)),将岩体可掘性划分为 7 级(表 1)^[40],克服了现有模型大多针对单一软岩或硬岩地层且不能考虑深部高地应力的缺陷。建立了不同围岩等级下开机率和掘进速度的评估预测模型。提出的 TBM 主参数、掘进性能预测模型克服了国际上现有的预测模型大多针对单一软岩或硬岩地层,不能考虑深部高地应力条件的缺陷。成果可有效指导煤矿深部高地应力软硬岩复合地层 TBM 选型设计和掘进性能预测。

$$I_{FP} = -61.958 + 0.590R_c + 14.980K_v + 0.1107H (R^2 = 0.873) \quad (1)$$

表 1 岩体 TBM 可掘性分级

Table 1 Rock mass boreability grading in TBM tunneling

岩体可掘性 分级	FPI(kN/Cutter/ mm/rev)	岩体可掘性 程度	建议推力与 最大推力百 分比/%	建议转速与 最大转速百 分比/%
1	<20	极好	45	75
2	20~30	很好	60	90
3	30~40	好	75	100
4	40~50	中等	90	95
5	50~60	差	95	95
6	60~70	很差	100	95
7	≥70	极差	100	90

2.3 深部软弱地层挤压变形卡机灾害精准预测与控制方法

造成 TBM 卡机的根本原因在于目前对 TBM 开挖卸荷条件下围岩挤压变形和卡机孕育发生机理研究不够深入,所建立的预测模型难以表征围岩破裂运动过程及其与护盾间的相互作用时空演化规律;现有对挤压变形卡机灾害的预测分析主要从工程地质、定性、经验模型和数值模拟角度分析卡机灾害发生的原因,难以指导卡机灾害事前预警;挤压变形卡机预测仍然主要依靠数值模拟,而数值模拟仍然以等效连续和离散方法为主;由于 TBM 掘进速度快、监测空间狭小、遮挡严重、传感器安装保护困难,目前国内外尚未见 TBM 掘进挤压变形卡机灾害监测预警的报道,导致 TBM 施工基本处于“盲掘”状态^[41]。总体而言,当前研究更侧重于 TBM 卡机致灾机理基础性研究,研究手段也较为传统,主要包括采用常规物理试验、基于传统连续或非连续的数值模拟方法和传统的变形监测等,使得挤压变形卡机灾害缺乏合适的分析预测手段、判别结果具有明显的

滞后性,即难以做到事前预警,通常待灾害发生后才被动采取脱困措施。对此,分别揭示了深部软弱地层 TBM 掘进挤压变形卡机致灾机理,提出了卡机灾害分析预测方法和监测预警方法,建立了挤压变形卡机灾害综合防控技术:

2.3.1 揭示了 TBM 掘进挤压变形卡机致灾机理

开展了深部巷道 TBM 开挖后围岩结构和扰动应力场演化过程的现场测试、物理与数值仿真研究,揭示了挤压变形卡机是由破裂扩展在围岩中形成的裂隙网络将围岩切割成离散的块体系统,块体间发生的剪切错动、张开分离和翻转运动导致围岩产生大量空隙,使围岩整体体积增大,形成碎胀大变形,从而对护盾形成挤压导致卡机。挤压变形实际上是破裂碎胀运动引起的碎胀大变形(图 12)。如图 13 所示,当 TBM 护盾区围岩变形量超过开挖预留的扩挖间隙时,围岩开始接触并挤压护盾,对护盾的挤压力来源于围岩破裂碎胀产生的剪胀力、碎胀力,进而对护盾产生摩阻力,当 TBM 推力不足以克服护盾摩阻力时便导致护盾被卡甚至损毁^[42]。

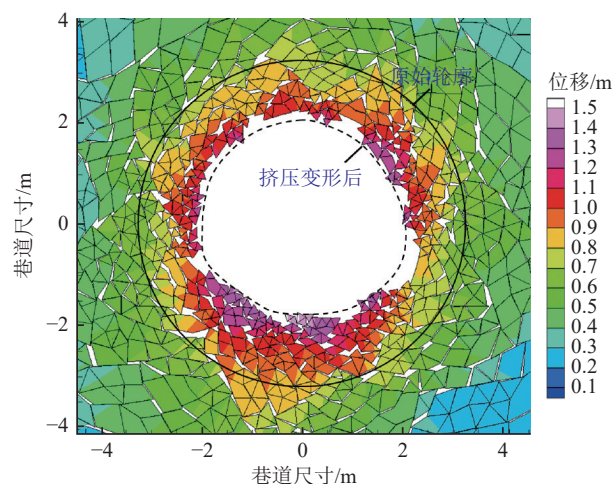


图 12 TBM 开挖围岩破裂碎胀挤压变形机理

Fig.12 Surrounding rock squeezing deformation mechanism due to fragmentation and bulking after TBM excavation

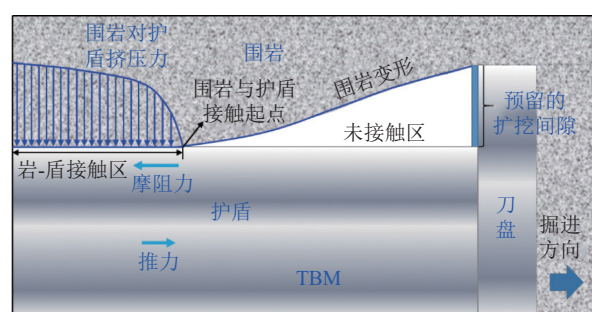


图 13 围岩与护盾相互作用致灾过程

Fig.13 Surrounding rock – shield interaction and the induced disaster process

2.3.2 发展了挤压变形卡机预测模拟的 FDEM 方法

采用传统的连续介质力学方法、非连续介质力学分析方法均难于模拟真实破裂过程,采用连续-非连续耦合的力学模型和模拟方法计算分析将更为合理。有限元法-离散元法耦合分析方法(Combined Finite-Discrete Element Method, FDEM)^[43],将块体划分成三角形有限元网格,在三角形单元公共边上插入起粘结作用的初始无厚度四边形节理单元(图14)^[44],通过节理单元的起裂-扩展-破坏来模拟破坏到碎裂全过程而实现连续介质向不连续介质的转变,在裂隙网络扩展、破裂过程和大变形计算中具有显著优势,是一种典型的连续-非连续分析方法,为软弱围岩破裂碎胀大变形过程分析提供了一种非常有效的解决途径。

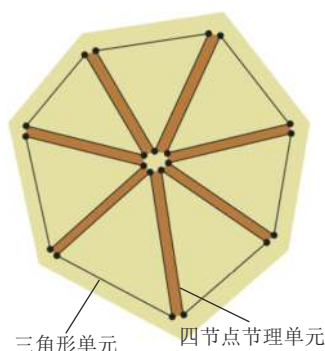


图14 FDEM将块体划分成三角形单元及中间插入起黏结作用的节理单元

Fig.14 Block is divided into triangular finite elements and crack elements in FDEM model

为了实现挤压变形卡机过程精细模拟,提出了基于FDEM方法的高效接触检索、碎胀变形时间效应、基于网格覆盖的掘进工作面空间支撑效应等模拟算法。为了更好地反映岩石的峰后剪切特性,提出了新的FDEM四边形节理单元剪切破坏本构模型,使得节理单元发生压剪破坏时能够保持住残余剪应力,更符合岩石压剪破坏力学特性,如下:

$$\tau = \begin{cases} \frac{|s|}{s_p} c, & |s| < s_p \text{ 且 } \sigma_n > 0 \\ \frac{|s|}{s_p} (c - \sigma_n \tan \varphi), & |s| < s_p \text{ 且 } \sigma_n < 0 \\ zc, & s_p < |s| < s_t \text{ 且 } \sigma_n > 0 \\ zc - \sigma_n \tan \varphi, & s_p < |s| < s_t \text{ 且 } \sigma_n < 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: τ 为剪切应力; σ_n 为法向应力($\sigma_n > 0$ 代表拉伸应力; $\sigma_n < 0$ 代表压缩应力); s 为剪切位移, s_p 、 s_t 分别代表峰值剪切位移和极限剪切位移; c 为黏聚力; φ 为内摩擦角; z 为峰后软化函数,如图15所示。

TBM掘进支撑效应模拟方法表征了掘进工作面、

护盾和支护结构对围岩的三重径向支撑作用^[45],其原理为:将巷道核心岩土体、TBM护盾和支护结构独立建模,在激活前仅存在掌子面对围岩的支撑作用;当核心岩土体软化至掌子面处时,将TBM护盾移至巷道处并激活,但不与核心岩土体发生接触作用;当核心岩土体软化至支护结构安装位置时,将支护结构(如衬砌或管片)移至巷道并激活,支护结构与掌子面、TBM护盾互相不接触,但与围岩发生接触,如图16所示。其中,TBM护盾等效刚度 E_{TBM} 采用下式计算:

$$E_{TBM} = \frac{s}{r} \frac{E_s}{1 - \nu_s} \quad (3)$$

式中: s 、 r 分别为护盾的厚度和半径; E_s 、 ν_s 分别为护盾的刚度和泊松比。

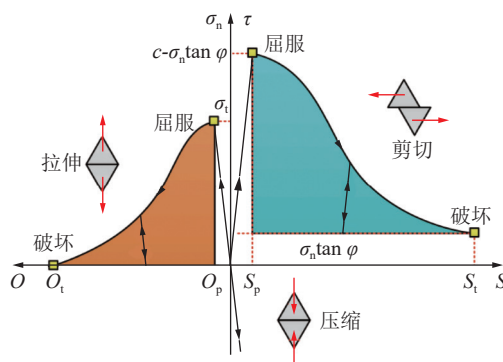


图15 FDEM节理单元本构模型

Fig.15 Constitutive model of FDEM joint element

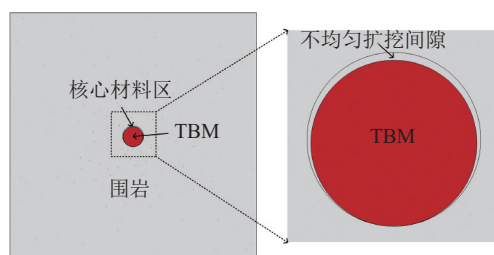


图16 TBM卡机灾变过程FDEM模拟原理

Fig.16 FDEM simulation principle of TBM jamming disaster

采用本方法,成功模拟了掘进工作面-围岩、TBM护盾-围岩及支护结构-围岩的相互作用关系,揭示了围岩破裂碎胀孕育演化造成的TBM卡机灾变发生机制。

为了更加真实模拟TBM掘进三维开挖过程,进一步提出了TBM卡机致灾过程三维FDEM模拟方法及相应的GPU并行加速算法,相比于传统串行算法,计算效率提高了上百倍,使得模拟真实三维巷道开挖过程成为了可能^[46]。

在 TBM 卡机灾害控制方面,通常需要对围岩采用衬砌+锚杆/索+喷混+注浆中的一种或几种手段进行支护, LISJAK 等^[47]提出了等效无厚度线单元锚杆模拟方法,实现了锚杆加固在 FDEM 中的表征,但难以模拟预应力锚固、端部锚固和托盘结构等。对此,提出了基于实体单元的锚杆/索模拟方法^[48],即在建模阶段把锚杆、锚固剂和托盘等结构建立起实体单元,并通过室内试验获得其力学参数和本构模型,实现锚杆加固的精细模拟;刘泉声等^[48]提出了基于破裂节理单元粘结修复的注浆加固模拟方法,实现了碎裂围岩注浆加固的有效模拟,如图 17 所示。此外,对于卡机脱困处理,邓鹏海等^[45]提出了扩挖导洞及导洞围岩加固模拟方法。

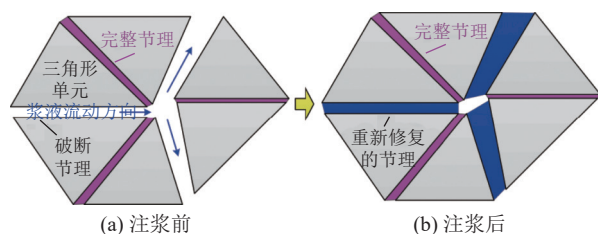


图 17 注浆加固模拟原理

Fig.17 Grouting reinforcement simulation principle

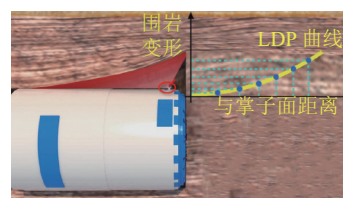
上述提出的挤压变形卡机和“锚注”支护控制过程 FDEM 模拟预测方法,实现了破裂扩展、结构体相互作用及运动过程的准确表征,对 FDEM 方法做出了突破性发展,克服了连续性方法无法模拟裂隙网络扩展-结构体运动过程,传统非连续方法无法准确表征结构体相互作用机理的根本缺陷。

2.3.3 TBM 掘进挤压变形卡机演化过程实时监测预警技术

针对现有 TBM 施工中缺乏针对挤压变形卡机灾害演化过程监测预警的现状,提出了基于线状激光雷达的护盾区域围岩收敛变形监测技术,自主研发了成套挂耳式感知装备^[49],TBM 停机时盾头处机箱内激光雷达探头通过推杆电机伸出测试护盾区域围岩收敛变形,据此提出了围岩纵向变形剖面曲线(LDP)、岩-盾接触范围计算方法(图 18),获取了护盾区域围岩挤压变形时空演化规律,突破了围岩与护盾间狭小空间、多岩渣粉尘、TBM 掘进速度快、护盾随 TBM 掘进同步前移的监测难题,为挤压变形卡机预警提供了数据基础。

针对岩-盾间狭小空间、护盾频繁快速前移特点,研发了一种测试围岩对 TBM 护盾挤压力的微型压力传感器及搭载方法,提出了护盾外表面阵列式微

型压力传感器直接测量+护盾内表面阵列式应变计间接测量互补的护盾挤压力监测技术(图 19)^[50],提出了基于网格覆盖法(有限元模拟和改进的牛顿迭代反演)的护盾分布荷载有限元反演方法(图 20),获取了围岩对护盾挤压力分布规律,突破了围岩与护盾狭小空间、恶劣监测环境下的挤压变形卡机监测预警难题。



(a) 感知方法与 LDP 曲线计算方法



(b) 挂耳式收敛变形感知装备

图 18 护盾区域围岩收敛变形监测技术

Fig.18 Monitoring technology for surrounding rock convergence in shield area

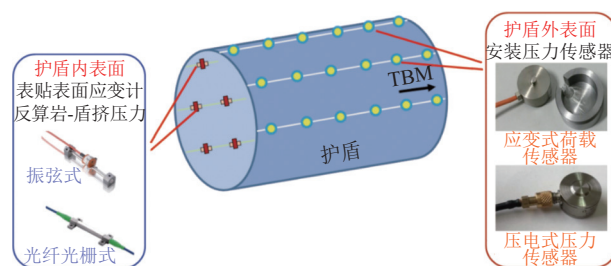


图 19 护盾挤压力阵列式感知方法

Fig.19 Array sensing method for shield surrounding rock pressure acting on shield

上述监测预警技术为国内外首创,能够分别获取围岩与护盾的接触范围、围岩对护盾的挤压力分布,从而计算出护盾前移所受到的摩阻力,进而根据卡机判据计算护盾被卡的安全系数和预测判断护盾是否被卡。该监测预警技术已在吉林引松工程、兰州水源地、G351 国道夹金山隧道和淮南张集矿、顾桥矿进行了现场应用(图 21)。

2.3.4 挤压变形卡机灾害综合防控技术

对于 TBM 掘进,锚(网)喷支护多用于敞开式

TBM, 在采用单/双护盾式 TBM 施工时, 常采用单层装配式管片衬砌结构。TBM 掘进对围岩扰动相对较小, 但对于深部巷道, 支护结构施作后围岩的变形并未停止, 将进一步造成支护结构的变形甚至破坏。由于不同支护方式对于荷载与变形的控制往往兼而有之, 传统的围岩稳定性理论如压力拱理论、塌落拱理论和应变控制理论均不能准确描述深部围岩与支护结构的相互作用。因此, 对于深部巷道 TBM 掘进围岩稳定性控制, 需要探讨不同支护结构形式、支护强度、支护时机对围岩的稳定性控制作用。

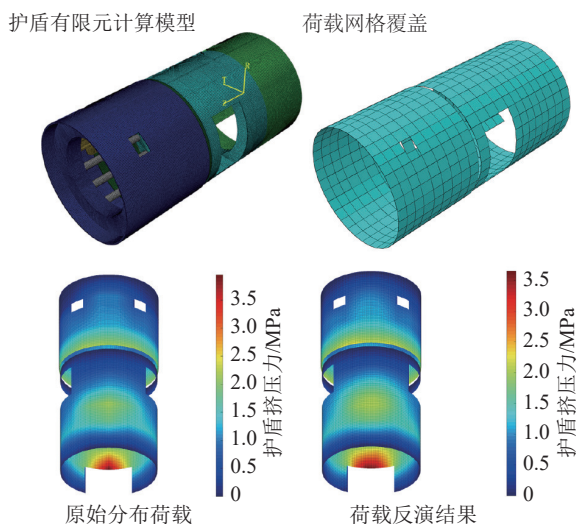


图 20 护盾挤压力网格覆盖法有限元反演方法

Fig.20 Mesh covering-based finite element inversion method for pressures on shield

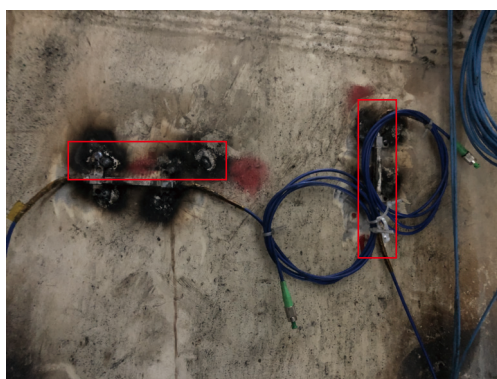


图 21 护盾挤压力现场监测

Fig.21 Field monitoring of surrounding rock pressure on shield

在分析总结深部围岩的变形破坏机理和稳定性演化规律的基础上, 提出了以“应力恢复、围岩增强、固结修复、应力转移与承载圈控制”为核心内容的煤矿深部巷道稳定性控制理论(图 22)。在该理论指导下, 通过在典型矿区各类典型围岩中的广泛试验验证, 提出了针对各级围岩进行深部巷道稳定控制的

技术措施体系, 形成了深部巷道围岩稳定性分步联合控制的成套技术^[51], 包括: ①集可控预应力高强锚杆和高强抗折喷层材料于一体的高预应力超强锚喷支护技术, 将锚固集中力转化为分布应力, 及时恢复表面卸荷应力, 改善围岩应力状态, 提高受应力状态控制的非固有强度; 可控预应力锚杆对近表一定厚度围岩施加可控预应力支护, 形成压力拱, 提高受应力状态控制的非固有强度; 增加沿裂隙面切向/法向的抗剪/抗拉强度。②经济型高强高韧注浆材料及分步注浆技术, 固结修复破裂区围岩, 恢复围岩完整性, 提高围岩固有强度, 克服了传统水泥基材料遇裂隙面张开错动开裂失效的技术难题。③新型预应力注浆锚索技术, 将“加固增强区-破裂修复区-深层稳定区”联结成“三明治”整体结构, 扩大围岩承载圈, 将应力峰值转移控制在适宜位置。④注浆管棚(幕)超前支护技术: 对前方极破碎围岩实现预先加固, 为后续施工提供安全防护。

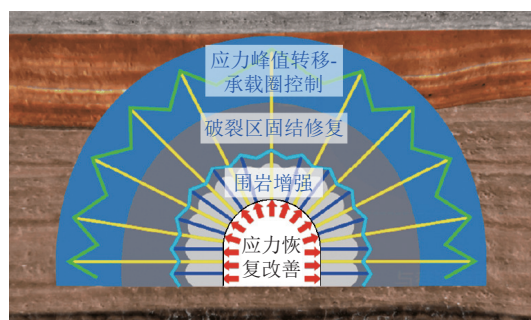


图 22 深部巷道分步联合控制作用原理

Fig.22 Principle of step-by-step combined supporting method for deep roadway

针对 TBM 掘进挤压变形卡机灾害控制与脱困处理, 首先提出了考虑挤压变形量、洞径和扩挖间隙相对关系的挤压变形卡机风险定量评价指标和等级划分方法。针对不同卡机风险等级, 根据 FDEM 模拟揭示和监测获取的围岩结构和扰动应力场的演化规律以及挤压变形、挤压力时空演化规律, 基于深部软弱围岩大变形分步联合控制理论, 提出了以“大变径扩挖、掘进参数优化(脱困模式掘进)和分步联合支护(超前管棚注浆加固、锚注一体化分步支护+钢拱架衬砌混凝土支护)”为核心的挤压变形卡机灾害防控脱困技术体系(图 23), 不同程度地实现上述技术原理。通过围岩与支护的耦合作用, 多重手段分步协同, 精准介入围岩结构与扰动应力场的演化过程, 实现挤压变形卡机灾害的有效控制。该技术在淮南顾桥煤矿等 TBM 工程进行了应用, 显著提高了

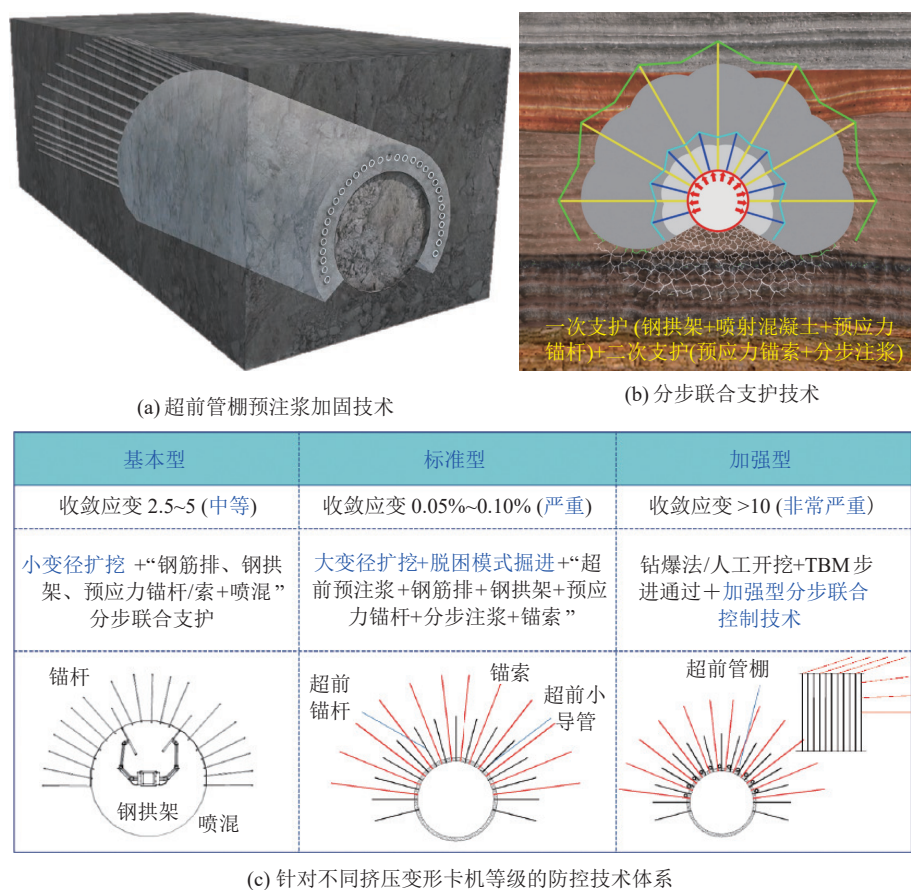


图 23 挤压变形卡机灾害综合防控技术体系

Fig.23 Comprehensive prevention and control technology system for squeezing deformable and TBM jamming disaster

掘进效率,确保了施工安全,取得良好效果。

2.4 复杂地层 TBM 安全高效掘进智能化决策控制技术

TBM 信息化智能化掘进须建立在对岩-机作用信息感知、分析决策和智能控制基础上。对当前和历史工程的 TBM 掘进海量数据可以被系统的分析和挖掘,用于掘进过程智能控制和工程灾害预警。目前,人工智能(AI)的蓬勃发展为 TBM 掘进岩-机作用互馈关系模型的建立和智能优化决策提供了一种新的途径。在岩体信息实时感知方面,张娜等^[52]基于 TBM 现场施工数据与地质资料,得到 TBM 单刀推力、贯入度与岩体体积节理数、岩石单轴抗压强度间的回归方程,以此对掘进面岩体参数进行感知;刘斌^[7]等基于单目标堆叠技术(SST)和支持向量回归(SVR)算法,提出了一种通过 TBM 掘进数据预测前方岩体参数的方法。在 TBM 掘进性能预测方面,如 YAGIZ 等^[53]基于不同隧道工程实测数据,分别利用神经网络、模糊识别及粒子群算法等智能方法,建立了 TBM 掘进速率及岩石脆性指数(BI)的预测模型;罗华^[54]引入了深度置信网络 DBN,并对其进行高斯分布输入特征值优化,在此基础上提出了一

种基于历史掘进位移序列数据和 DBN 模型的 TBM 性能预测方法。另一类是采用 2 种或 2 种以上的算法进行混合,如 MOHAMMADREZA 等^[55]结合萤火虫算法与神经网络提出一种预测 TBM 贯入度的模型 FA-ANN,将岩体参数与掘进参数作为模型的输入。上述研究表明机器学习算法在处理海量数据方面具有巨大优势,可有效解决传统回归模型难以处理的高度复杂问题,进而实现岩-机作用关系的模型表征。但现有研究大都仅通过 TBM 机器本身的机电液信息进行掘进参数预测,忽略了地层变化和监测的岩-机作用信息,进行优化决策时基本上是以净掘进速度最快、能耗最小或者二者的组合为优化目标,但未能在优化目标中很好地考虑设备利用率、灾害风险的影响;而 TBM 掘进效率和施工安全本质上取决于岩-机相互作用,进行 TBM 智能掘进关键在于岩-机互馈关系的挖掘和模型建立。对此,在这 3 方面取得了一定研究进展:

1)提出了 TBM 掘进过程岩-机作用多源信息实时感知方法。TBM 掘进岩-机作用包括刀盘刀具-掘进工作面作用、围岩-护盾作用两方面,其中围岩-护盾作用信息感知方法在 2.3 节中已进行了介绍。

①提出了基于滚刀刀座C型垫块应变测量的滚刀受力实时感知方法(图24);进一步建立了滚刀系统多自由度耦合振动微分方程,提出了滚刀系统振动微分方程的Wilson- θ 反分析识别方法^[56],形成了通过垫块应变监测→垫块受力计算→滚刀荷载识别计算方法。

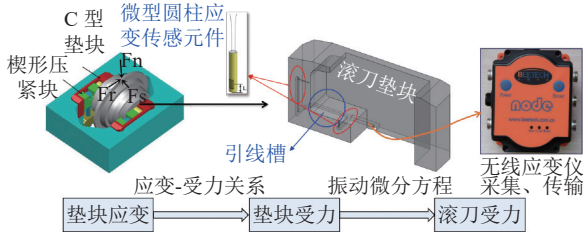


图24 TBM滚刀受力监测方法

Fig.24 TBM cutting force monitoring method

②研发了基于无线三向加速度计及矿用防爆加速度计的刀盘振动实时监测方法,提出了加速度计在刀盘上的布设方法,如图25所示;形成了刀盘振动信息感知-传输-分析系统;提出了基于快速傅里叶变换的TBM刀盘振动时域分析、频域分析方法。

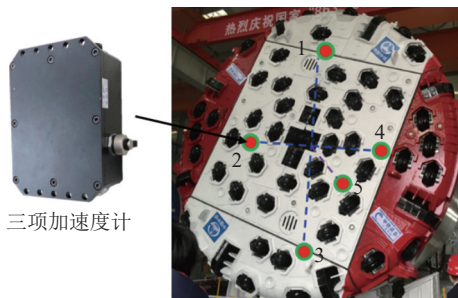


图25 刀盘振动实时监测方法

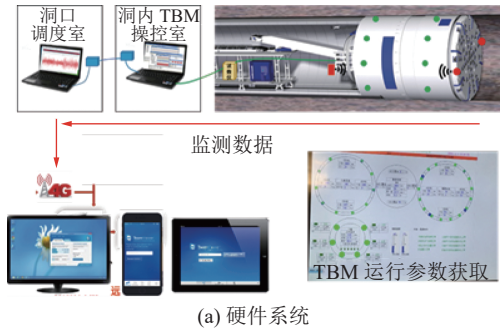
Fig.25 Real-time monitoring method for cutter-head vibration

③基于上述TBM掘进岩-机作用信息(滚刀受力、刀盘振动、护盾区围岩变形和护盾挤压力)实时感知技术^[57],建立了岩-机作用信息实时监测系统(含软、硬件平台)(图26)^[50]。建立的岩-机作用信息感知系统在多个输水隧洞和交通隧道TBM上搭载应用,还在淮南顾桥煤矿TBM上进行了搭载应用(图27),实时获取了TBM机器运行状态的多源信息(掘进控制参数、机械电液参数及岩-机作用信息),建立了TBM掘进岩-机作用数据库,为工程灾害防控和掘进参数智能决策控制提供了数据基础。

④针对数据库中岩体参数信息不能及时获取的难题,对于拥有少量掘进参数和较多机器运行参数的情况,分别建立了AdaBoost-CART算法模型和SMBO-CatBoost算法模型进行岩体信息实时感知(图28)^[58],实现了通过TBM掘进参数和感知信

息对掘进工作面岩体参数的实时反馈。

图28b式中: $\bar{e}$ 为五折交叉验证过程中的累计平均预测误差, e_i 为每次交叉验证过程中的预测误差。



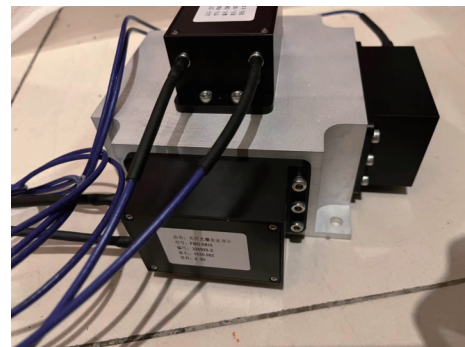
(a) 硬件系统



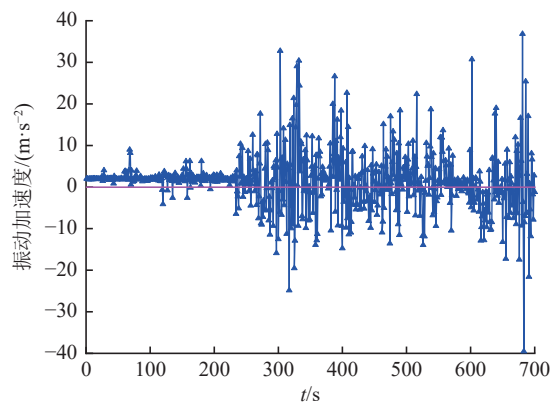
(b) 软件平台

图26 TBM掘进岩-机作用实时感知系统

Fig.26 Real-time monitoring system for surrounding rock and TBM interaction



(a) 监测系统搭载



(b) 振动监测结果

图27 TBM掘进振动实时监测

Fig.27 Real-time monitoring for TBM tunneling vibration

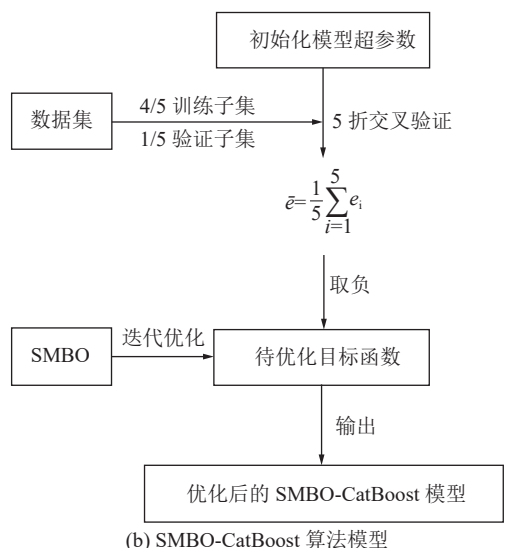
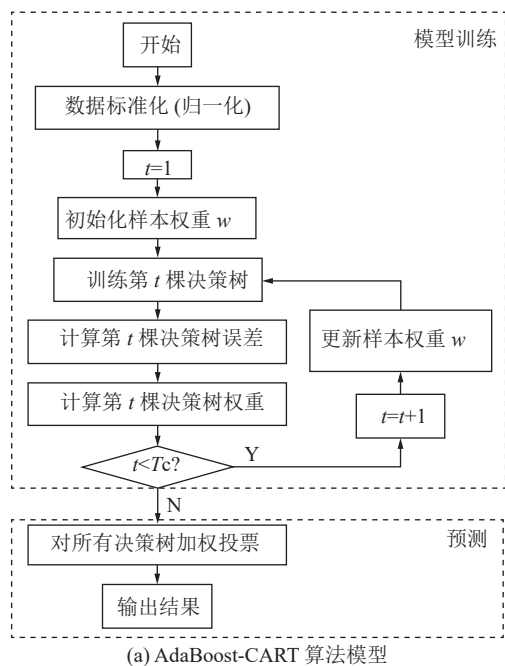


图 28 岩体信息实时感知模型

Fig.28 Real-time perception model of rock mass information

2)提出了基于多算法融合的掘进控制参数多目标自适应智能决策方法。①进行 TBM 掘进参数实时预测: 基于上述感知获取的 TBM 掘进大数据, 建立了基于 QPSO(量子粒子群)-ANN(神经网络)融合算法的 TBM 掘进控制参数(刀盘转速 RPM 与贯入度 PRev)预测模型(图 29), 通过掘进循环上升段各掘进参数以及围岩等级和感知获取的岩-机作用信息共 17 个特征预测稳态段掘进控制参数(刀盘转速以及贯入度), 克服了传统误差反向传播神经网络(BPNN)易陷入局部最优的缺陷, 提高了模型全局寻优能力和预测精度。②在上述模型基础上, 建立了破岩比能最小、掘进速率最大、挤压变形卡机灾害风

险最小的目标优化函数, 据此在上述掘进参数预测模型的基础上对其损失函数进行改进(式(4)), 建立了基于 ILF(Improved Loss Function)-QPSO-ANN 的掘进控制参数(刀盘转速和推力)优化模型(图 30), 以改进损失函数中各优化子目标对应的权重系数 α_1 、 α_2 、 α_3 作为决策变量(式(4)), 将掘进控制参数的决策转化为多目标优化问题, 提出了 TBM 掘进控制参数随地层变化的自适应动态智能决策方法, 突破了基于多源信息感知与多算法融合的掘进控制参数自适应智能决策。测试结果表明决策结果能够有效降低刀盘破岩比能, 并提高 TBM 净掘进速率(图 31)。

$$\text{Loss}' = \text{Loss} + c_1 E_s + c_2 (-V) + c_3 (R_1) = \alpha_1 l(f(x), y) + \alpha_2 E_s + \alpha_3 (-V) + \alpha_3 (R_1) \quad (4)$$

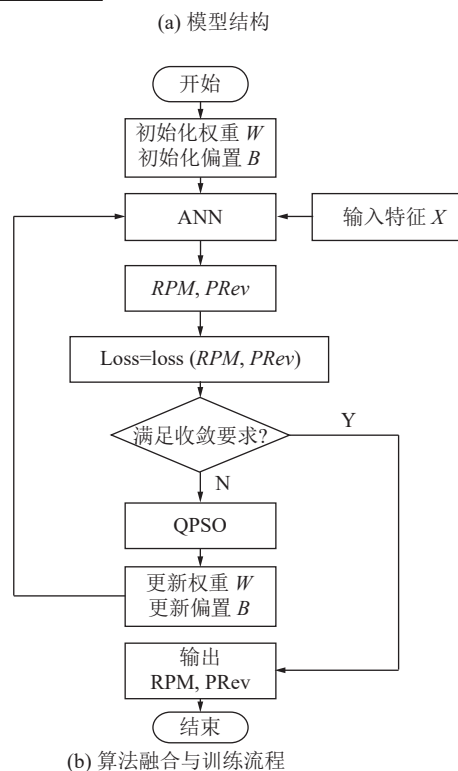
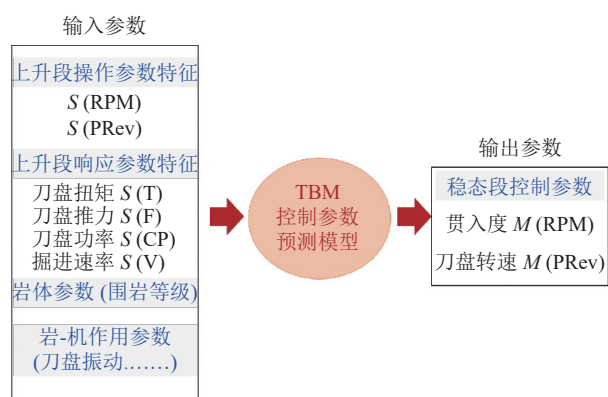


图 29 TBM 掘进参数 QPSO-ANN 实时预测模型
Fig.29 QPSO-ANN model for TBM advance parameter real-time prediction

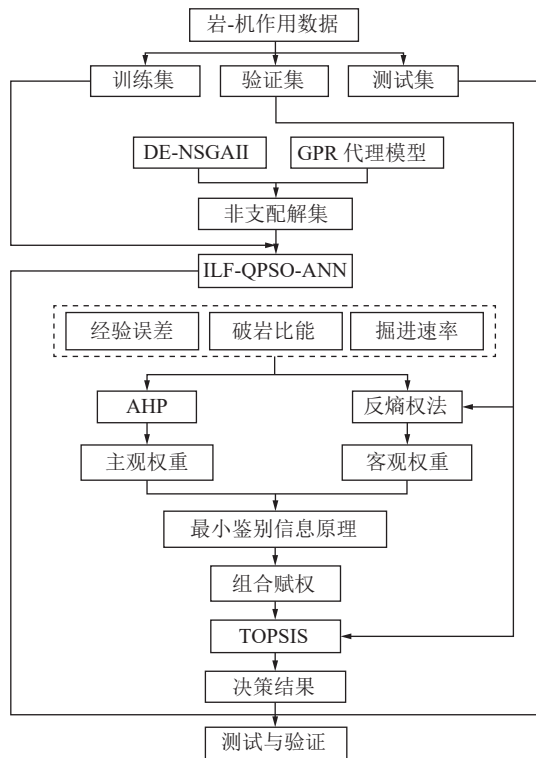


图 30 掘进控制参数智能决策算法流程

Fig.30 Flow chart of intelligent decision algorithm for advance control parameters

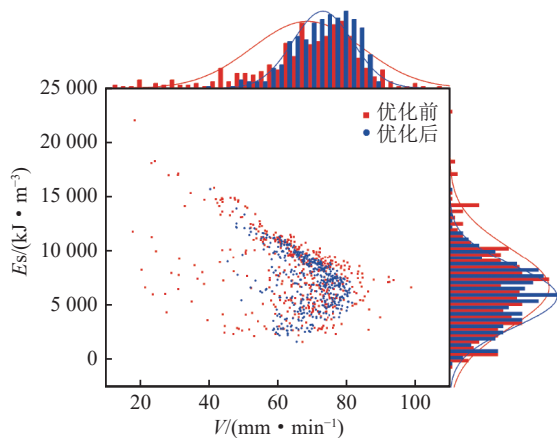


图 31 TBM 掘进参数智能决策效果

Fig.31 Intelligent decision effect of TBM tunneling parameters

式中: V 为掘进速率, mm/min ; E_s 为破岩比能, kJ/m^3 ; R_l 为卡机预测风险。

下一步将集成构建 TBM 掘进多源信息感知、灾害预警与掘进参数智能决策控制大数据平台, 为 TBM 掘进装备装上“智慧大脑”。

3 结论与展望

TBM 工法经济技术优势显著, 正成为煤矿巷道快速掘进的一种新方法, 对解决采掘持续紧张难题发挥重要作用。分析了煤矿特殊的施工环境和复杂

地质条件下深部巷道 TBM 掘进面临的技术挑战, 论述了相关研究进展。主要结论如下:

1) 煤矿特殊施工环境使得 TBM 掘进面临设备系统防爆, 狭小空间运输、组装始发和接收拆装, 专用排渣运输系统及矿井开拓系统等适应性设计难题。相关煤矿、设备厂家和研究机构对煤矿 TBM 装备适应性设计进行了许多有益探索, 主要包括设备系统防爆设计, 大体积超重部件分体模块化、轻量化和小型化设计, 形成了井下有限空间内 TBM 运输、组装、拆卸技术; 以及巷道狭小空间内自动锚杆钻机快速钻进、主梁下置预留上部锚杆施打空间等特殊功能设计; 小半径转弯施工工艺优化和姿态调整控制技术; 不良地质体超前探测和超前处理适应性设计等, 为 TBM 应用于煤矿巷道掘进积累了宝贵经验。

2) 煤系复合地层破岩机理不清, 高效破岩控制难度大。对此, 开展了高围压条件下针对软硬岩复合地层的全尺寸滚刀线性切割和回转破岩试验, 揭示了地应力水平、岩石强度及岩性变化、掘进控制模式、滚刀安装半径等对 TBM 破岩效率和破岩模式的影响机理; 提出了深部复合地层 TBM 主参数和掘进性能预测模型, 克服了国际上现有的预测模型大多针对单一软岩或硬岩地层, 不能考虑深部巷道高地应力条件的缺陷, 指导煤矿深部巷道 TBM 选型设计与掘进性能预测。

3) TBM 在煤矿巷道软弱地层中掘进卡机灾害风险大, 预测和控制难度大。对此, 揭示了深部软弱地层 TBM 掘进破裂碎胀大变形卡机灾害孕育发生机理; 发展了挤压变形卡机灾害孕育演化及控制过程预测模拟的 FDEM(有限元-离散元耦合)方法, 准确表征了卡机灾害形成机制和锚注控制作用机理; 研发了围岩位移线状激光雷达和挤压力传感器阵列卡机监测系统, 实现了卡机灾害实时监测预警; 形成了挤压变形卡机灾害“大变径扩挖、掘进参数优化和分步联合支护”为核心的综合防控技术体系, 实现了围岩结构与扰动应力场演化过程精准介入控制。

4) 复杂环境下 TBM 掘进过程信息感知难度大, 难以根据监测信息进行决策控制和灾害预警。对此, 提出了 TBM 掘进过程岩-机作用信息(刀盘刀具-掌子面作用、围岩-护盾作用信息)实时感知技术; 初步提出了 TBM 掘进控制参数自适应智能决策方法, 降低了 TBM 掘进参数控制对人为经验的依赖、调整滞后和易决策失误的局限。

上述成果将提高 TBM 在煤矿复杂环境中的掘

进技术水平。TBM 在煤矿中的应用还处于试验探索阶段,需要在 TBM 装备和矿井布设系统适应性设计理论、煤系地层高效破岩技术、卡机灾害精准预测与智能预警方法、“智能辅助驾驶”技术等方面进一步深入研究,推动煤矿巷道 TBM 实现安全高效掘进。

参考文献(References):

- [1] 何满潮,谢和平,彭苏萍,等.深部开采岩体力学研究[J].*岩石力学与工程学报*,2005,24(16):2803-2812.
HE Manchao, XIE Heping, PENG Suping, *et al.* Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(16): 2803-2812.
- [2] 岩石隧道掘进机(TBM)施工及工程实例[M].北京:中国铁道出版社,2004:337.
Full Face rock tunnel boring machine (TBM) construction and engineering example [M]. Beijing: China Railway publishing House, 2004: 337.
- [3] 陈 馈,孙振川,李 涛. TBM设计与施工[M].北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.
CHEN Kui, SUN Zhenchuan, LI Tao. TBM design and Construction [M]. Beijing: China Communications Press Co. Ltd., 2018.
- [4] LIU Quansheng, HUANG Xing, GONG Qiuming, *et al.* Application and development of hard rock TBM and its prospect in China[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, 57: 33-46.
- [5] ZHENG Yanlong, ZHANG Qianbing, ZHAO Jian. Challenges and opportunities of using tunnel boring machines in mining[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, 57(4): 287-299.
- [6] JING Liujie, LI Jianbin, ZHANG Na, *et al.* A TBM advance rate prediction method considering the effects of operating factors[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2021, 107: 103620.
- [7] LIU Bin, WANG Ruirui, GUAN Zengda, *et al.* Improved support vector regression models for predicting rock mass parameters using tunnel boring machine driving data[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 91: 102958.
- [8] 刘泉声,黄 兴,时 凯,等.煤矿超千米深部全断面岩石巷道掘进机的提出及关键岩石力学问题[J].*煤炭学报*,2012,37(12):2006-2013.
LIU Quansheng, HUANG Xing, SHI Kai, *et al.* Utilization of full face roadway boring machine in coal mines deeper than 1 000 km and the key rock mechanics problems[J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(12): 2006-2013.
- [9] HUANG Xing, LIU Quansheng, SHI Kai, *et al.* Application and prospect of hard rock tbn for deep roadway construction in coal mines[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 73: 105-126.
- [10] HANDEWITH H. J. TBM tunnels in the western hemisphere-an overview [J]. *Tunneling Technology Newsl.* 1983, 41: 1-8.
- [11] STACK B. Handbook of mining and tunnelling machinery [M]. 1982, J. Wiley.
- [12] ROBBINS R. J. Future of mechanical excavation in underground mining[J]. *Mining Engineering*, 1984, 36: 617-627.
- [13] CIGLA M, YAGIZ S, OZDEMIR L. Application of tunnel boring machines in underground mine development [A]. 17th International Mining Congress and Exhibition of Turkey [C]// Ankara, Turkey, 2001: 155-164.
- [14] HOME L, ASKILSRUD O.G. Tunnel boring machines in mining (Third edition) [M]. Darling P. (Ed.), SME Mining Engineering Handbook, USA: SME, 2011, pp. 1255-1270.
- [15] BROX D. Technical considerations for the application of TBMs for mining projects. Trans. Soc. Mining Metall. Explor. 2013, 334, 498-505.
- [16] 唐 彬,程 桦,姚直书,等. TBM施工煤矿深埋硬岩巷道围岩稳定性分析及工程应用[J].*采矿与安全工程学报*,2016,33(2):260-264.
TANG Bin, CHENG Hua, YAO Zhishu, *et al.* Stability analysis and engineering application of TBM deep coal mine roadway and surrounding rock[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2016, 33(2): 260-264.
- [17] TANG Bin, CHENG Hua, TANG Yongzhi, *et al.* Experiences of gripper TBM application in shaft coal mine: A case study in Zhangji coal mine, China[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 81: 660-668.
- [18] 杨生华,芮 丰,蒋卫良,等.煤矿全断面岩巷掘进机开发应用与发展[J].*煤炭科学技术*,2019,47(6):1-10.
YANG Shenghua, RUI Feng, JIANG Weiliang, *et al.* Development and application of full-section rock tunneling boring machine in coal mine[J]. *Coal Science and Technology*, 2019, 47(6): 1-10.
- [19] 程 桦,唐 彬,唐永志,等.深井巷道全断面硬岩掘进机及其快速施工关键技术[J].*煤炭学报*,2020,45(9):3314-3324.
CHENG Hua, TANG Bin, TANG Yongzhi, *et al.* Full face tunnel boring machine for deep-buried roadways and its key rapid excavation technologies[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(9): 3314-3324.
- [20] 张洪伟,胡兆锋,程敬义,等.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 Zhao Feng, CHENG Jingyi, *et al.* 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.
- [21] 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.
- [22] 范京道,封 华,宋朝阳,等.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 Zhaoyang, *et al.* Key techno-

- logy 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.
- [23] 管志华. 提升煤矿盾构机(TBM)在巷道掘进过程中的支护效率[J]. 煤矿现代化, 2021, 30(5): 65–68.
- ZAN Zhihua. Improving the support efficiency of coal mine shield machine (TBM) in the process of tunnel excavation[J]. Coal Mine Modernization, 2021, 30(5): 65–68.
- [24] TOTH A, GONG Q M, ZHAO J. Case studies of TBM tunnelling performance in rock-soil interface mixed ground[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2013, 38: 140–150.
- [25] GONG Qiuming, YIN Lijun, MA Hongsu, *et al.* TBM tunnelling under adverse geological conditions: An overview[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2016, 57: 4–17.
- [26] 罗超文, 李海波, 刘亚群. 煤矿深部岩体地应力特征及开挖扰动后围岩塑性区变化规律[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(8): 1613–1618.
- LUO Chaowen, LI Haibo, LIU Yaqun. Characteristics of in-situ stress and variation law of plastic zone of surrounding rocks around deep tunnels in a coal mine[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(8): 1613–1618.
- [27] BARTON A A N. TBM tunnelling in jointed and faulted rock [M]. Rotterdam: Balkema, 2000, 61–64.
- [28] 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.
- [29] 尚彦军, 杨志法, 曾庆利, 等. TBM施工遇险工程地质问题分析和失误的反思[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(12): 2405–2411.
- SHANG Yanjun, YANG Zhifa, ZENG Qingli, *et al.* Retrospective analysis of TBM accidents from its poor flexibility to complicated geological conditions[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(12): 2405–2411.
- [30] 尚彦军, 史永跃, 曾庆利, 等. 昆明上公山隧道复杂地质条件下TBM卡机及护盾变形问题分析和对策[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(21): 3858–3863.
- SHANG Yanjun, SHI Yongyue, ZENG Qingli, *et al.* TBM Jamming and deformation in complicated geological conditions and engineering measures[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(21): 3858–3863.
- [31] EVERT HOEK, PAUL MARINOS. Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses[J]. Tunnels and Tunnelling International, 2000, 32(11): 45–51.
- [32] European Construction Technology Platform, Strategic research agenda for the European underground construction sector. www.ectp.org. 2005.
- [33] LI Jianbin, JING Liujie, ZHENG Xiaofeng, *et al.* Application and outlook of information and intelligence technology for safe and efficient TBM construction[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 93: 103097.
- [34] 龚秋明, 何冠文, 赵晓豹, 等. 掘进机刀盘滚刀间距对北山花岗岩破岩效率的影响实验研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(1): 54–60.
- GONG Qiuming, HE Guanwen, ZHAO Xiaobao, *et al.* Influence of different cutter spacings on rock fragmentation efficiency of Beishan granite by TBM[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(1): 54–60.
- [35] 龚秋明, 张浩, 李真, 等. 机械破岩试验平台研制[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(2): 17–25.
- GONG Qiuming, ZHANG Hao, LI Zhen, *et al.* Development of a Testing Platform for Mechanical Rock Breaking[J]. Modern Tunneling Technology, 2016, 53(2): 17–25.
- [36] PAN Yucong, LIU Quansheng, PENG Xingxin, *et al.* Full-scale linear cutting tests to propose some empirical formulas for TBM disc cutter performance prediction[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52: 4763–4783.
- [37] PAN Yucong, LIU Quansheng, LIU Qi, *et al.* Full-scale linear cutting tests to check and modify a widely-used semi-theoretical model for disc cutter cutting force prediction[J]. Acta Geotechnica, 2020, 15: 1481–1500.
- [38] MACIAS F. J. Hard rock tunnel boring: Performance predictions and cutter life assessments [D]. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2016.
- [39] ROSTAMI J., OZDEMIR L. A new model for performance prediction of hard rock TBMs [C]//Proceedings of Rapid Excavation and Tunneling Conference. USA, 1993, 794–809.
- [40] LIU Quansheng, LIU Jianping, PAN Yucong, K, *et al.* A case study of TBM performance prediction using a Chinese rock mass classification system-Hydropower Classification (HC) method[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 65: 140–154.
- [41] RAMONI G, ANAGNOSTOU G. The Interaction Between Shield, Ground and Tunnel Support in TBM Tunnelling Through Squeezing Ground[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2011, 44: 37–61.
- [42] 刘泉声, 黄兴, 时凯, 等. 深部挤压性地层TBM掘进卡机孕育致灾机理[J]. 煤炭学报, 2014, 39(S1): 75–82.
- LIU Quansheng, HUANG Xing, SHI Kai, *et al.* The mechanism of TBM shield jamming disaster tunnelling through deep squeezing ground[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(S1): 75–82.
- [43] ANTE MUNJIZA. The combined finite-discrete element method [M]. London: John Wiley & Sons, Ltd., 2004.
- [44] LISJAK A, GRASSELLI G. A review of discrete modeling techniques for fracturing processes in discontinuous rock masses[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2014, 6: 301–314.
- [45] 邓鹏海. 深部软弱地层TBM掘进挤压变形卡机及防控过程FDEM数值模拟研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2019.
- DENG Penghai. FDEM numerical simulation study on the TBM jamming and prevention-control process due to squeezing deformation in deep soft ground [D]. Wuhan: Wuhan University, 2019.
- [46] LIU He, LIU Quansheng, MA Hao, *et al.* A novel GPGPU-parallelized contact detection algorithm for combined finite-discrete

- element method[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2021, 144: 104782.
- [47] LISJAK A, YOUNG-SCHULTZ T, LI B, *et al.* A novel rockbolt formulation for a GPU-accelerated, finite-discrete element method code and its application to underground excavations[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2020, 134: 104410.
- [48] 刘泉声, 邓鹏海, 毕晨, 等. 深部巷道软弱围岩破裂碎胀过程及锚喷-注浆加固FDEM数值模拟[J]. *岩土力学*, 2019, 40(10): 4065–4083.
- LIU Quansheng, DENG Penghai, BI Chen, *et al.* FDEM numerical simulation of the fracture and extraction process of soft surrounding rock mass and its rockbolt-shotcrete-grouting reinforcement methods in the deep tunnel[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2019, 40(10): 4065–4083.
- [49] HUANG Xing, LIU Quansheng, XU Xianze, *et al.* Lidar-based Convergence Deformation Monitoring System for Surrounding Rock around TBM Shield Region [P]. US: 16556246, 2022.08.24.
- [50] HUANG Xing, LIU Quansheng, LIU He, *et al.* Development and in-situ application of a real-time monitoring system for the interaction between TBM and surrounding rock[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2018, 81: 187–208.
- [51] 刘泉声, 高玮, 袁亮. 煤矿深部岩巷稳定控制理论与支护技术及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [52] 张娜, 李建斌, 荆留杰, 等. 基于隧道掘进机掘进过程的岩体状态感知方法[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2019, 53(10): 1–9.
- ZHANG Na, LI Jianbin, JING Liujie. Prediction method of rock-mass parameters based on tunnelling process of tunnel boring machine[J]. *Journal of Zhejiang University*, 2019, 53(10): 1–9.
- [53] YAGIZ S. Development of rock fracture and brittleness indices to quantify the effects of rock mass features and toughness in the CSM model basic penetration for hard rock tunneling machines [D]. Golden: Colorado School of Mines, 2002.
- [54] 罗华. 基于线性回归和深度置信网络的TBM性能预测研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- LUO HUA. Application of linear regression analysis and deep belief network for performance prediction of TBM [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [55] Mohammadreza K, Ahmad F, Ebrahim N G, *et al.* Development of a new hybrid ANN for solving a geotechnical problem related to tunnel boring machine performance[J]. *Engineering with Computers*, 2020, 36: 345–357.
- [56] HUANG Xing, WANG Shaohua, LIU Quansheng, *et al.* Development of a real-time monitoring and calculation method for TBM disc-cutter's cutting force in complex ground[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2022, 45(5): 961–984.
- [57] HUANG Xing, LIU Quansheng, HUANG Tao, *et al.* Method and apparatus for monitoring the interaction between surrounding rocks and TBM in TBM tunneling process [P]. US: 16/508, 316, 2022–03–15.
- [58] LIU Quansheng, WANG Xinyu, HUANG Xing, *et al.* Prediction model of rock mass class using classification and regression tree integrated AdaBoost algorithm based on TBM driving data[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2020, 106: 103595.