

煤矿深部巷道碎胀大变形灾害控制及大变形灾变环境下 TBM 快速成巷技术

刘泉声^{1,2}, 刘 滨³, 唐 彬⁴, 康永水³, 卢海峰^{1,2}, 朱元广³, 黄 兴³, 潘玉丛^{1,2}, 邓鹏海^{1,2},
孙 磊^{1,2}, 唐永志⁵, 卢兴利³, 张程远³, 余宏淦^{1,2}, 李培涛^{1,2}, 雷一鸣^{1,2}, 贾浩男^{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; 4. 安徽理工大学 土木建筑工程学院, 安徽 淮南 232001; 5. 淮南矿业(集团)有限责任公司, 安徽 淮南 232001)

摘 要:随着浅部煤炭资源逐步枯竭, 煤炭开采不断向深部发展, 我国东部矿区和中西部部分矿区已经进入深部开采阶段。然而, 由于深部岩体的高地应力环境及采掘过程的强扰动效应, 深部巷道大变形灾害频发, 严重制约了深部煤炭资源的安全高效开发。如何有效控制巷道围岩稳定及提升掘进效率已成为深部煤炭开发面临的重大技术挑战, 主要体现在: 对深部巷道米级大变形灾变的机理认识尚不清晰; 缺乏适用于深部巷道大变形灾害控制的理论与技术; 缺乏适应大变形灾变环境的快速成巷技术。针对以上问题, 围绕中东部典型矿区深部巷道米级大变形灾变机理、深部巷道大变形灾害控制理论及技术体系、大变形灾变环境下的快速成巷技术等方面展开了系统研究, 取得了以下进展: 提出了深部巷道围岩应力场和变形破裂导致的围岩结构扰动演化过程的探测表征方法, 发展了深部巷道大变形灾变过程模拟分析的 FDEM 方法, 揭示了深部巷道米级大变形灾害孕育形成的破裂碎胀-大位移运动机理; 提出了由“应力恢复、围岩增强、固结修复、应力转移-承载圈控制”四项控制原理构成的深部围岩稳定性分步联合控制理论, 建立了精准介入围岩结构与扰动应力场演化过程、多重手段分步协同的灾害控制理论与技术体系; 研发出深部巷道大变形灾变环境下 TBM 安全高效掘进关键技术, 发展了 TBM 掘进过程挤压变形卡机灾害预测控制方法, 建立了深部煤系地层 TBM 系统适应性设计理论与评价决策体系。研究成果实现了典型矿区深部巷道碎胀大变形灾害的有效控制和安全高效掘进, 解决了深部矿井采掘接替的技术难题。

关键词:煤矿深部巷道; 碎胀大变形灾害; 灾变机理; 控制理论与技术; TBM 快速成巷
中图分类号: TD353 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2025)01-0224-21

The control of fragmenting swelling deformation disasters in deep mine roadways and the efficient TBM tunneling technology under such conditions

LIU Quansheng^{1,2}, LIU Bin³, TANG Bin⁴, KANG Yongshui³, LU Haifeng^{1,2}, ZHU Yuanguang³, HUANG Xing³,
PAN Yucong^{1,2}, DENG Penghai^{1,2}, SUN Lei^{1,2}, TANG Yongzhi⁵, LU Xingli³, ZHANG Chengyuan³,
YU Honggan^{1,2}, LI Peitao^{1,2}, LEI Yiming^{1,2}, JIA Haonan^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Key laboratory for 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

收稿日期: 2024-12-12 策划编辑: 郭晓炜 责任编辑: 黄小雨 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2024.1544

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (U21A20153); 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (2042024rs0001)

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

引用格式: 刘泉声, 刘滨, 唐彬, 等. 煤矿深部巷道碎胀大变形灾害控制及大变形灾变环境下 TBM 快速成巷技术[J]. 煤炭学报, 2025, 50(1): 224-244.

LIU Quansheng, LIU Bin, TANG Bin, et al. The control of fragmenting swelling deformation disasters in deep mine roadways and the efficient TBM tunneling technology under such conditions[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(1): 224-244.



移动阅读

Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China; 4. School of Civil Engineering, Anhui University of Science & Technology, Huainan, 232001, China; 5. Huainan Mining Industry (Group) Co., Ltd., Huainan 232001, China)

Abstract: As shallow coal resources are gradually exhausted, the exploitation of deep coal resources goes deeper, where all mines in eastern China and some mines in central-western China have entered the deep mining stage. However, due to the high stress conditions in deep rock masses and the strong disturbance during tunnelling, large deformation disasters frequently occur in deep coal mine roadways, significantly constraining the safe and efficient exploitation of deep coal resources. Effectively controlling the surrounding rock stability and improving excavation efficiency has become a major technical challenge in deep coal development, including: unclear mechanisms of meter-scale large deformation in deep coal mine roadways; insufficient theories and technologies for large deformation control; limited safe and efficient tunneling techniques that adapt to such environments. To address these issues, this paper systematically studied the large deformation mechanism and control method, as well as the safe and efficient tunnel techniques in typical mining areas in the central and eastern regions of China. The following advancements have been achieved: detection and characterization methods for the evolution of stress field and rock structure in deep complex strata was proposed, along with the development of a numerical method for large rock deformation and failure process simulation, to reveal the fragmenting-swelling induced large deformation mechanism in deep roadways; A stepped combined control theory for large deformation was proposed, based on the principles of stress recovery, rock reinforcement, consolidation repair, and stress transfer. And a technical system, featuring precise intervention of stress fields and rock structures evolution and multi-step combined measurements, was established to control large deformation disasters; key technologies for safe and efficient TBM excavation under large deformation disaster conditions were developed. Particularly, prediction and control methods for jamming disasters during TBM excavation were proposed, along with a system for adaptive TBM design and decision-making in deep complex strata. These research advancements have effectively controlled large deformation disasters, and ensured safe and efficient excavation in deep roadways of typical mining areas, achieving the mining/excavation balance in deep mines.

Key words: deep coal mine roadways; large deformation disaster; disaster forming mechanism; disaster control theory and technology; efficient TBM tunneling technology

0 引 言

煤炭是我国的主要能源,目前已探明的煤炭资源储量中 53% 埋深超过 1 000 m。随着浅部煤炭资源日渐枯竭,我国东部地区全部矿井和中西部地区部分矿井已进入深部开拓开采阶段^[1-2]。据不完全统计,目前开采深度超过 1 000 m 的矿井已达 50 余座,最大采深达 1 500 m(如孙村、孔庄煤矿等),且以 10~25 m/a 的速度向深部延伸^[3-4]。可以预见,未来东部矿区将向更大采深发展,中西部将会有越来越多的矿井进入深部开拓开采阶段。

相对于浅部开采,深部煤矿围岩的赋存环境与力学行为有显著差异。以淮南、平顶山等中东部较早进入千米深部开采的典型矿区为例,受郯庐断裂、秦岭大别山造山运动的强烈作用,深部围岩地应力极高(20~30 MPa),且岩体破碎(仅淮南矿区探明的落差>5 m 的断层就达 5 300 余条)。伴随着巷道掘进过程的“强卸荷”作用,围岩大范围破坏失稳导致巷道频繁发生米级收敛大变形甚至巷道封闭型大变形,工程灾害

频发,严重影响矿井通风运输安全和煤炭生产^[5]。传统的围岩稳定性控制理念、支护措施和施工工艺已经远远不能满足深部巷道剧烈大变形灾害控制的要求^[6-7]。同时,在米级剧烈大变形的灾变环境下,深部巷道掘进效率低,且需频繁翻修,导致采掘接续紧张^[8-9]。因此,深部巷道大变形灾害防控以及大变形灾变环境下快速掘进技术是我国深部煤炭开采亟需解决的重大课题。

笔者从深部煤矿围岩赋存条件入手,围绕中东部典型矿区深部巷道米级大变形灾变机理、深部巷道大变形灾害控制理论及技术体系、大变形灾变环境下的 TBM 快速成巷技术等方面展开了系统研究,旨在实现深部巷道围岩稳定和碎胀大变形灾害的有效控制,实现安全高效掘进,解决深部矿井采掘接替的技术难题。

1 煤矿深部巷道碎胀大变形灾变机理

1.1 研究现状及挑战

厘清深部巷道大变形灾害孕育机理与灾变模式,

是实现大变形灾害预测评价以及安全控制的前提。当前学者在巷道大变形孕灾机理理论分析和模型试验等方面开展了大量研究。

理论研究方面,国际岩石力学学会^[10]认为围岩的挤压变形是岩体内部剪应力引起的具有时效性的剪切蠕变;陈宗基^[11]将巷道变形机理归结为围岩扩容+挠曲、塑性楔体向内移动、围岩回弹、内应力释放和扩容膨胀;孙钧和朱中华^[12]系统研究了不同岩石和结构面的蠕变、松弛特性,将围岩挤压变形归为变形速率快而收敛慢、达到稳定时间长、位移量值大的非线性流变的变形范畴;SAARI^[13]将岩体挤出现象视为弹黏塑性行为,发生在岩石变形至残余塑性状态时;AYDAN^[14]将挤压变形归纳为完全剪切破坏、屈曲破坏、拉伸劈裂-剪切滑移破坏 3 种模式;何满潮等^[5]认为软岩巷道大变形是由围岩受物化作用引起的静态膨胀、围岩屈服产生的应力扩容(包括流变)、围岩峰后碎裂引起的结构变形的一种或多种组合。

室内试验方面,MAHMUTOGLU^[15]、靖洪文等^[16]、于德海和彭建兵^[17]通过室内单轴、三轴压缩试验研究了在不同围压状态下岩石强度、变形特征和破坏模式之间的关系;徐卫亚^[18]、刘钦^[19]、黄兴等^[20]分别对绿片岩、页岩、泥岩等开展了不同围压、不同加卸载方式的流变试验,研究了岩体流变规律以及偏应力-应变关系特性。同时,为反映深部巷道围岩引起挤压大变形的开挖卸荷应力条件,朱建明等^[21]开展了三轴峰前和峰后加卸载试验,研究了卸围压应力路径对岩石强度和变形特征的影响。此外,赵启峰等^[22]、顾金才^[23]、李利平和李术才^[24]、张智慧等^[25]开展了隧(巷)道掘进室内相似模型试验以更加直观地观测隧(巷)道围岩破裂失稳大变形灾变过程。

基于以上结果,学者们建立了相应的围岩本构关系和强度模型。周小平等^[26]基于断裂力学角度建立了卸荷岩体强度准则;孙钧等^[27]提出了二维黏弹塑性和大变形三维弹黏塑性本构模型;STERPI^[28]采用西原模型建立了考虑由累积黏塑性应变驱动的损伤因子的黏塑性模型;DEBERNARDI 等^[29]提出了一种同时考虑弹塑性以及时效性的本构模型;陈卫忠^[30]提出了修正 BQ 值预测巷道挤压变形的方 法;卢兴利等^[31]建立了描述岩石卸荷条件下损伤扩容和破裂碎胀演化机制的本构模型。

现有研究成果为揭示大变形机理提供了重要基础,但通过研究发现,传统的大变形理论基本上只能解释时效剪胀引起的分米级变形机理,难以解释我国煤矿深部巷道米级大变形现象^[32]。此外,我国典型矿区深部巷道特有的米级剧烈大变形的孕灾机理和发

生模式十分复杂,现有研究大多停留在对已发生大变形灾害结果的现象描述层面,由于深部巷道围岩内部的复杂性和不可见性,围岩扰动应力场和破裂引起的裂隙场、位移场时空演化全过程难以观测,难以准确描述米级大变形的孕育致灾过程。因此,需要对深部高应力环境开挖强卸荷作用下巷道大变形的围岩时效损伤扩容-破裂碎胀机理及模型表征进行深入研究。

1.2 研究思考及进展

巷道变形破坏与其围岩结构和应力场的演化密切相关。在深部高应力条件下进行巷道开挖,围岩表面的法向应力卸荷至零,应力重分布在巷道围岩中形成周向应力集中,远远超过围岩强度,导致围岩由表及里发生破坏。破裂区逐步向围岩内部发展,相应地应力峰值也由表及里逐步向围岩内部转移,并在围岩中形成破裂碎胀区、损伤扩容区和连续变形区。因此掌握巷道开挖后围岩结构及应力场的扰动演化规律是揭示深部巷道米级大变形机理的基础。

针对深部巷道米级大变形灾害孕育过程难捕捉、动态演化规律难表征的难题,我们首先提出了深部破碎软弱围岩应力场测试技术及深部围岩变形破裂监测技术,为监测捕捉围岩扰动应力、变形破裂-围岩结构演化过程提供了有效手段;进一步研发了深部巷道围岩破裂碎胀过程连续非连续耦合模拟的 FDEM 方法,实现了全空间围岩破裂扩展、块体相互作用及运动过程的模拟表征。通过监测和模拟,率先揭示出我国煤矿典型矿区深部巷道米级大变形的围岩破裂碎胀运动-大位移过程机理。

1.2.1 深部破碎软弱围岩应力场测试技术

地应力是影响巷道围岩稳定性的关键因素之一。常规的地应力测试方法,如水压致裂法和套心应力解除法,对围岩完整性要求极高,很难在破碎软弱岩体中成功实施。而煤矿深部围岩受沉积环境和多期区域构造运动的影响,通常表现出岩质软弱、节理裂隙发育、力学强度低等特征,难以满足这种苛刻的测试条件。此外,常规地应力测试手段多为单次测试,不能获得长期、实时扰动应力演化过程;且大都只能获取某一确定方向的压力,无法掌握围岩三维应力状态动态演化。因此,测定煤矿深部巷道节理裂隙发育的软弱围岩中的地应力需要寻找更为有效的测试方法。

为解决这一难题,本团队创新性地提出了流变应力恢复法地应力测试新方法,基于波分复用原理研制了六向应力光纤光栅传感器,提出单孔多点分布式测试方法,建立了地应力场演化监测平台。基于深部高应力作用下破碎软弱围岩的强流变性质,实现巷道围岩原岩应力场与扰动应力场的动态实时监测,已在淮

南、平顶山矿区成功实施测点 > 120 个, 成功率 > 95%^[33-34]。图 1 给出了淮南矿区谢桥煤矿 12526E 工作面 50.5 m 超深顺层孔扰动地应力测试, 揭示出巷道开挖强卸荷作用下围岩扰动应力场的演化过程。

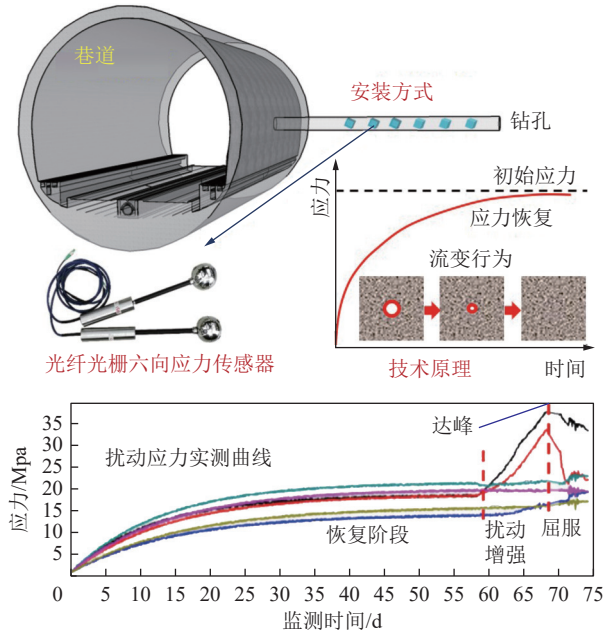


图 1 流变应力恢复法地应力测量技术及其在谢桥煤矿应用

Fig.1 Stress-recovery method for geostress measurement and its application in Xieqiao coal mine

流变应力恢复法基本原理如图 1 所示, 利用深部高应力作用下破碎软弱围岩的强流变性, 埋设的传感器能够测量六个不同方向的正应力 (此为传感器感知的流变恢复正应力, σ_{si}), 从而计算得到该测点处钻孔前的正应力 σ_{ni} :

$$\sigma_{ni} = k_i \sigma_{si} \quad (1)$$

式中: k 为无量纲的传感器的流变应力恢复系数, 取值依赖于岩石流变模型及参数^[34]; 下标 $i=1, 2, \dots, 6$ 代表 6 个方向的正应力。

从而计算得到测点的应力状态:

$$\begin{pmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{pmatrix}^T = \begin{bmatrix} l_1^2 & m_1^2 & n_1^2 & 2l_1m_1 & 2m_1n_1 & 2n_1l_1 \\ l_2^2 & m_2^2 & n_2^2 & 2l_2m_2 & 2m_2n_2 & 2n_2l_2 \\ l_3^2 & m_3^2 & n_3^2 & 2l_3m_3 & 2m_3n_3 & 2n_3l_3 \\ l_4^2 & m_4^2 & n_4^2 & 2l_4m_4 & 2m_4n_4 & 2n_4l_4 \\ l_5^2 & m_5^2 & n_5^2 & 2l_5m_5 & 2m_5n_5 & 2n_5l_5 \\ l_6^2 & m_6^2 & n_6^2 & 2l_6m_6 & 2m_6n_6 & 2n_6l_6 \end{bmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \sigma_{n1} \\ \sigma_{n2} \\ \sigma_{n3} \\ \sigma_{n4} \\ \sigma_{n5} \\ \sigma_{n6} \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中: $l_i, m_i, n_i (i=1, 2, \dots, 6)$ 为传感器各测量单元的测量方向与传感器所在局部坐标系坐标轴夹角的方向余弦。

进而将该局部坐标系下的应力分量转换到大地坐标系中, 可求解出 3 个主应力的值 ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) 及方向 (倾角 α_i 和方位角 β_i):

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= 2 \sqrt{-\frac{P}{3} \cos \frac{W}{3} + \frac{1}{3} J_1} \\ \sigma_2 &= 2 \sqrt{-\frac{P}{3} \cos \frac{W+2\pi}{3} + \frac{1}{3} J_1} \\ \sigma_3 &= 2 \sqrt{-\frac{P}{3} \cos \frac{W+4\pi}{3} + \frac{1}{3} J_1} \\ \alpha_i &= \sin^{-1} n_i \\ \beta_i &= \beta_0 - \sin^{-1} \frac{m_i}{\sqrt{1-n_i^2}} \end{aligned} \quad (3)$$

式中:

$$\begin{aligned} J_1 &= \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z \\ J_2 &= \sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_z \sigma_x - \tau_{xy}^2 - \tau_{yz}^2 - \tau_{zx}^2 \\ J_3 &= \sigma_x \sigma_y \sigma_z - \sigma_x \tau_{yz}^2 - \sigma_y \tau_{zx}^2 - \sigma_z \tau_{xy}^2 + 2 \tau_{xy} \tau_{yz} \tau_{zx} \\ P &= -\frac{1}{3} J_1^2 + J_2, \quad Q = -\frac{2}{27} J_1^3 + \frac{1}{3} J_1 J_2 - J_3, \\ W &= -\arccos \left[-Q / \left(2 \sqrt{-\left(\frac{P}{3} \right)^3} \right) \right] \end{aligned} \quad (4)$$

1.2.2 深部围岩变形破裂监测技术

围岩承受的高地应力与其自身低强度之间的突出矛盾导致深部巷道开挖后裂隙快速萌生扩展, 围岩由表及里快速劣化。与浅部地层相比, 深部地层围岩结构演化通常存在明显的非线性、时间空间变异性。因此, 确定围岩变形破裂的范围和破裂演化过程对理解失稳机理有重要作用。

目前煤矿现场采用的巷道围岩变形破裂监测方法有多点位移计法 (主要是顶板离层计) 和光纤光栅方法等。然而, 多点位移计法一般单个孔仅能设置 3~5 个测点, 难以精确掌握较大范围的围岩内部结构演化规律; 强反射光栅和分布式光纤测试方法可以实现围岩位移的连续监测, 但这两种方法的总量程均受到限制, 难以精细监测大范围围岩的变形破裂发展演化过程。由于一般岩体峰值应力时的应变小于 1%, 巷道发生米级大变形时波及的围岩变形破裂范围超过百米, 因此, 必须找到能在百米范围跟踪监测围岩变形破裂演化过程的手段。

近年来, 基于弱反射光纤光栅传感原理的大量程测试技术在围岩变形破裂监测中得到发展应用。相对于分布式光纤测量方法和强反射光纤光栅测量方法, 弱反射光纤光栅大量程测试技术的变形测试容量大大提升, 成本显著降低 (大约为分布式光纤测量方

法的 1/3)。因此,本团队基于弱光纤光栅传感技术,研制出弱光纤光栅阵列大量程应变传感器,并配套矿用隔爆型多通道解调仪使用,结合本团队发明的围岩表面与内部变形自动一体化实时监测技术,研发了“多点位移一体化自动监测+弱反射光纤光栅大量程位移监测”互补的围岩变形破裂监测技术(图 2a),在近场采用多点位移一体化自动监测技术监测围岩深度破裂-碎胀的发展演化过程,在中远场采用弱反射光纤光栅大量程位移监测技术监测围岩破裂-损伤-连续变形发展演化过程,形成有效互补。本技术系统在淮南和平煤矿区深部巷道等工程中推广应用^[35-36],图 2b 给出了顾桥南翼胶带机大巷测站不同孔深围岩实时监测形变曲线,揭示巷道开挖强卸荷作用下围岩破裂碎胀区-损伤扩容区-连续变形区发展演化过程。其监测精度高(± 0.1 mm)、测点密度高(亚米级),实现了深部巷道百米范围变形破裂过程的连续跟踪监测,克服了既有方法(多点位移计、强反射光栅和分布式光纤)难以大范围监测变形破裂过程的难题。

多点位移一体化自动监测技术以全站仪为平台,采用快速建站、无线数据传送、靶标自动识别与照准计算等一系列技术,实现围岩表面变形的快速自动监

测与实时分析预警。并发明了一种围岩内部变形光学观测装置,通过孔内锚固头位移牵引孔口转盘转动,与反光膜片形成角度错动,引起照射反光片的反射激光 CCD 图像灰度模式变化,可分析得到围岩内部位移信息。对同一测点,一台仪器分别接收中心靶标和外圈靶标的反射信息,解析得到表面和内部位移,实现围岩表面变形与内部变形自动一体化实时监测(图 3)。

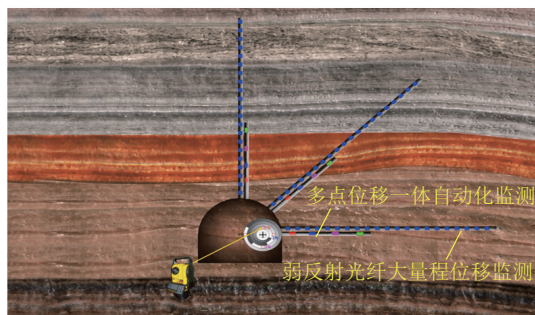
弱反射光纤光栅大量程位移监测技术以光纤内部刻录的弱反射光栅作为基本传感单元,采用时分复用串联传感技术,实现准分布式传感,并利用光谱低反射特性与反射光谱的时间间隔显著提升传感网络的传感容量。在光纤纤芯刻录后,通过在纤芯外部的包层使入射光波在纤芯与包层之间发生全反射,从而继续沿光纤传播。同时,包层外部覆盖以环氧树脂等高分子材料为主的涂覆层,在提高光纤拉伸强度的同时还有效减少了散射光的干扰。此外,为满足工程监测的需要,设计了多级保护层:最外层 PE 护套可防止环境因素对内部结构的破坏;中间层为显著增强传感器的机械性能的铠装材料;内层为可传递外部应变的松套管。光纤监测数据通过光纤解调仪进行自动收集汇总,并及时的传入服务器程序中。

进一步开发了深部围岩变形监测系统(图 4),包括硬件和软件两大部分:硬件部分主要包括应变光缆、通讯传输光缆、锚固件,以及多通道超弱光纤光栅解调仪等设备;软件部分为安装在地面监控端口上的监测软件。在实际应用中,以弱光纤光栅传感器为基础的传感单元,采用集成化设计,将多个光纤传感器布设于巷道围岩不同断面中。当围岩发生变形或破裂时,传感器内的光栅栅距、反射率及反射波长会发生变化,通过与大容量弱光纤光栅解调仪连接,转化为可识别的电信号和数字信号。转换后的井下信号通过煤矿内部局域网络传输至地面监控室,经处理后以数据和图像形式直观呈现。该系统实现了井下巷道围岩应变与位移数据的实时显示与动态更新,并通过数据曲线清晰展示巷道围岩的实时动态。

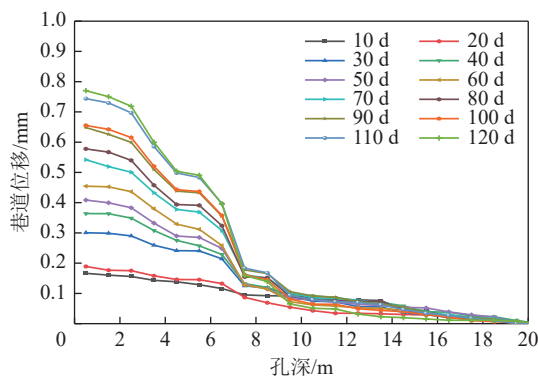
1.2.3 深部巷道大变形机理模拟的 FDEM 方法

深部巷道大变形失稳灾变过程的显著特点是围岩由连续到非连续转化的跨尺度力学行为。通过理论解析和室内试验的方法均难以定量描述这一复杂的运动规律,这就需要发展能够模拟巷道大变形灾变过程中的围岩破裂碎胀-大位移演化机理的数值分析方法。

当前的数值模拟方法大多基于传统的连续或非连续假定,难以较好地反应深部高地应力条件下开挖



(a) 围岩变形监测技术示意



(b) 围岩变形监测结果

图 2 “多点位移一体化自动监测+弱反射光纤大量程位移监测”互补的围岩变形破裂监测技术及应用

Fig.2 Mechanism and application of “Multi-point displacement metre+weak reflection optical fiber” combined rock deformation and fracture monitoring technology

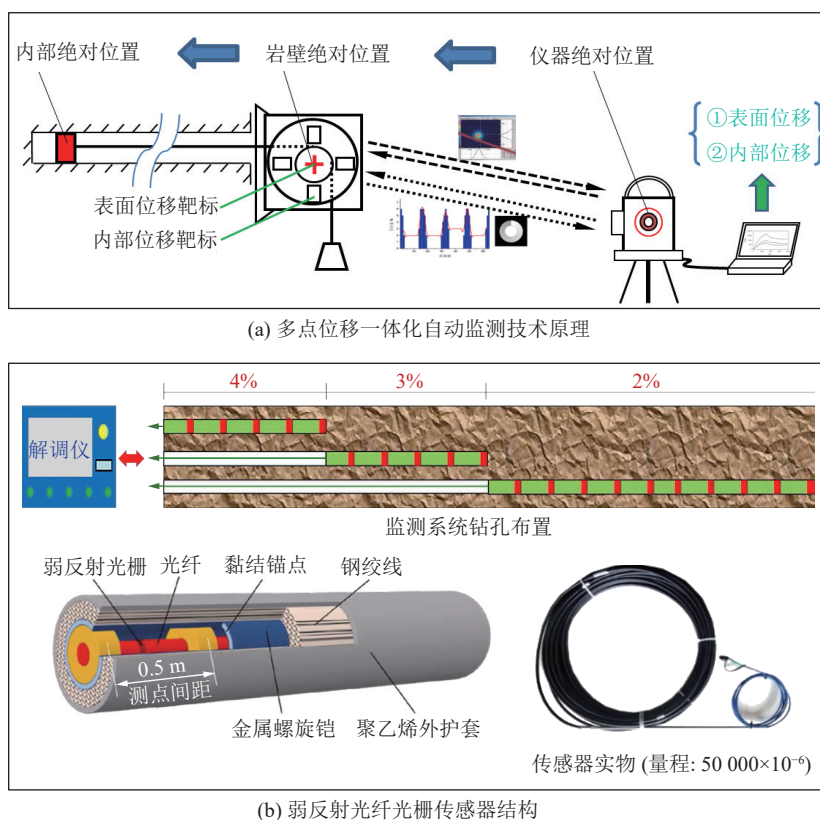


图 3 多点位移一体化自动监测技术原理及弱反射光纤光栅传感器结构

Fig.3 Development of multi-point displacement automatic metre and weak reflection optical fiber

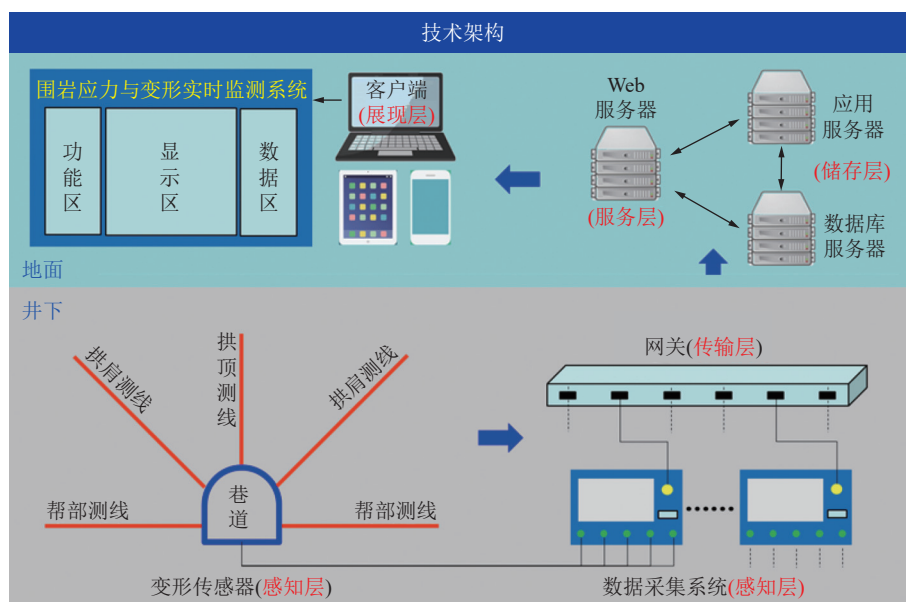


图 4 深部围岩变形监测系统

Fig.4 Deep surrounding rock deformation monitoring system

强扰动引起的软弱围岩损伤扩容-破裂碎胀时空演化过程。一方面,连续介质力学方法,基于小变形与连续性假设,难以有效模拟深部破碎软弱围岩中广泛发生的复杂裂隙网络扩展及破裂后岩块分离、错动滑移及翻转等大位移过程;另一方面,非连续介质力学方法无法模拟块体基元的开裂,也存在接触本构参数难

以选取和计算效率低等问题,使得其难以适用于工程尺度问题的精细模拟。本团队扬长避短,研发了深部巷道米级大变形孕灾机理连续-非连续耦合模拟的 FDEM 方法,实现了全空间围岩破裂扩展、块体相互作用及运动过程的模拟表征,克服了连续性方法难以模拟复杂裂隙网络扩展-块体运动过程,非连续方法

难以准确表征破裂-块体形成过程的缺陷。

在 FDEM 模拟算法中,巷道几何模型离散为常应变三角形单元及在两个三角形单元中间插入的四边形黏聚力单元(图 5)。其中三角形单元采用广义胡克定律计算变形后的柯西应力,假定三角形单元一直处

于弹性应变状态,用于模拟岩石块体的弹性变形;四边形黏聚力单元用于模拟岩石块体间的相互作用及破裂过程,并根据实验卸荷曲线建立了黏聚力单元的本构模型,可将破坏形式分为张拉、剪切和拉剪破坏。

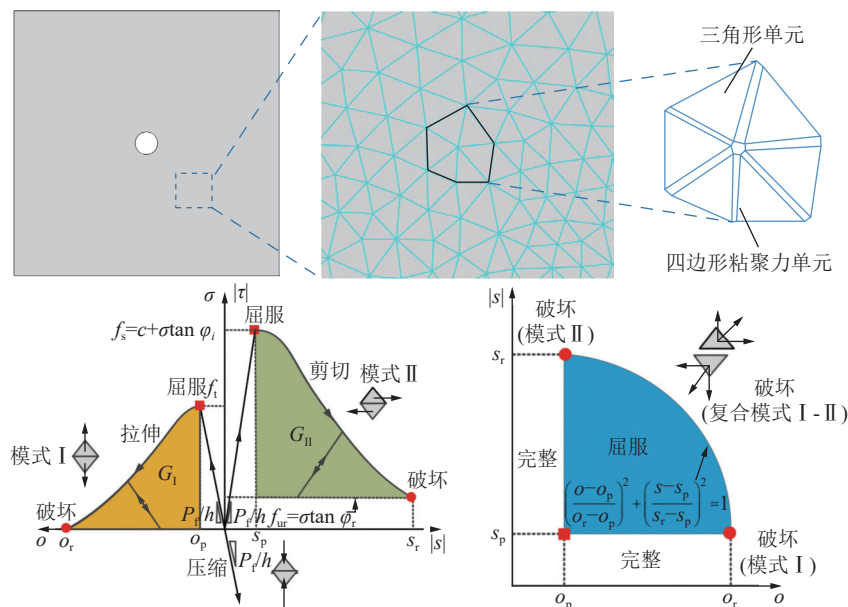


图 5 FDEM 模型网格划分及节理单元破坏模式

Fig.5 FDEM mesh and constitutive model of joint element

巷道开挖卸荷过程的模拟主要包括 2 个模块:深部应力场施加和巷道开挖施工(图 6)。深部应力场的施加是通过在整个模型单元中施加应力张量来模拟,通过黏滞阻尼对系统动能进行耗散。在系统达到稳定之后,把边界条件转换成零位移边界条件,从而将产生的应力场锁定在整个巷道模型之内;在完成地应力施加后,进一步模拟巷道开挖施工过程。开挖过程采用开挖单元软化法,使开挖区域单元的弹性模量逐

步降低,从而减少其对软化区相邻围岩的支撑力。在单元软化过程中,对系统总动能进行监测,当总动能降至给定阈值之下后,继续对开挖软化单元的弹性模量进行折减,直至开挖完成。值得注意的是巷道围岩在开挖卸荷过程中,其力学参数(如弹性模量、抗拉强度等)也随开挖卸荷量的变化而变化,且在不同的卸荷区域有不同的变化规律。通过升轴压卸围压加载路径下的三轴卸荷试验,揭示了岩体弹性模量、黏聚

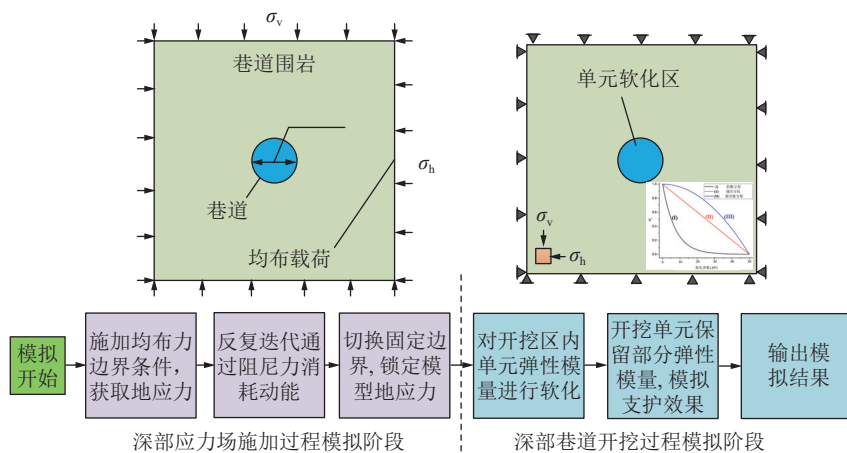


图 6 基于单元软化法的 FDEM 巷道开挖模拟流程

Fig.6 Excavation simulation process based on element softening method

力和抗拉强度随卸荷量的变化规律:

$$\begin{cases} E(H) = E_{\max} - (E_{\max} - E_{\min})H \\ c(H) = c_{\max} - (c_{\max} - c_{\min})H \\ f_t(H) = f_{t,\max} - (f_{t,\max} - f_{t,\min})H \\ H = \frac{|\sigma_3^0 - \sigma_3|}{\sigma_3^0} \end{cases} \quad (5)$$

式中: H 为卸荷应力比; $E(H)$ 和 $c(H)$ 分别为卸荷过程中任意卸荷量下的弹性模量和黏聚力; $E_{\max}$ 和 $c_{\max}$ 分别为卸荷开始前的初始弹性模量和黏聚力; $E_{\min}$ 和 $c_{\min}$ 分别为卸荷结束时的弹性模量和黏聚力。 $f_t(H)$ 为卸荷过程中任意卸荷量下的抗拉强度; $f_{t,\max}$ 和 $f_{t,\min}$ 分别为卸荷开始前和卸荷结束时的抗拉强度。

随着巷道核心部位岩体弹性模量的持续软化, 得

到破裂碎胀大变形模拟结果 (图 7)。可见高地应力和开挖卸荷作用下, 围岩破裂扩展形成裂隙网络将围岩切割成离散块体系统, 块体的剪切、张开和翻转运动导致块体间产生大量空隙, 这些碎裂块体向隧道空间移动造成了隧道断面的急剧缩小, 以致巷道产生米级碎胀大变形。围岩块体的碎胀运动是深部巷道米级大变形灾害形成的主要动因^[37]。通过建立大变形灾变机理的损伤扩容-破裂碎胀过程的 FDEM 模拟算法, 可以有效地对高地应力条件下开挖卸荷过程中围岩拟弹性阶段的连续变形、损伤阶段的有限体积扩容以及破裂后的碎胀-大位移演化机理进行表征, 从而实现对高地应力作用下巷道碎胀大变形灾害的模拟预测。

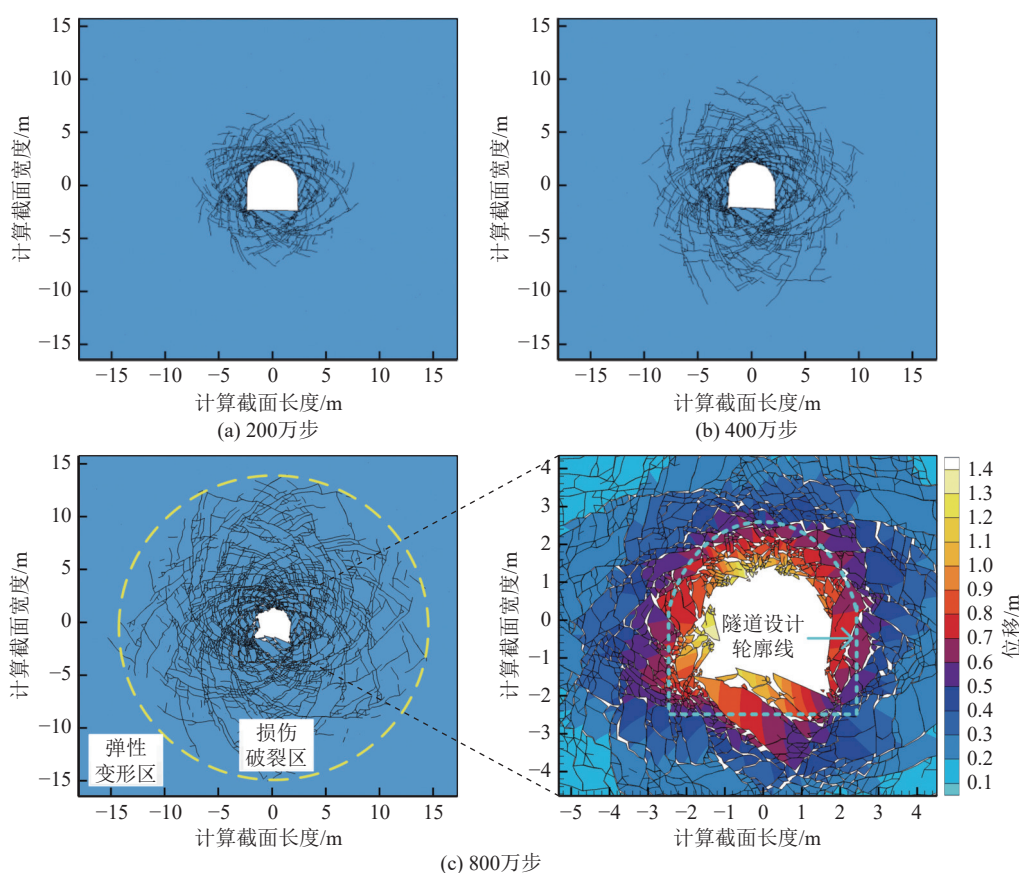


图 7 巷道碎胀大变形过程模拟

Fig.7 Simulation results of the large deformation process

2 煤矿深部巷道碎胀大变形灾害控制理论与技术

2.1 研究现状及挑战

煤矿深部巷道大变形和失稳破坏屡屡出现, 而传统支护结构大面积频繁失效、巷道频繁返修, 不仅严重影响巷道掘进工程进度, 影响矿井的正常运输和通风安全, 也造成矿井建设和维护成本急剧攀升、开采

效率急剧下降, 且在返修过程中还可能引起安全事故, 造成人员伤亡。深部巷道围岩稳定性控制已成为矿井安全高效生产中的重大技术难题。

我国煤矿深部巷道米级大变形灾害控制是世界级难题。尽管英国、德国等世界传统产煤大国和强国比我国更早进入深部开采, 但由于围岩稳定控制难、支护成本高, 导致煤炭开发经济效益差, 环境影响大, 已相继在上世纪 90 年代和本世纪初停止了煤炭开采。

深部巷道围岩稳定性控制在国际上没有可借鉴的理论和技術。目前,我国煤矿深部巷道支护技术与方法可大致归纳为以下几种形式^[5-7]:①以 U 型钢支架为代表的让压支护方法^[38-40];②以预应力锚杆、锚索结合喷射混凝土衬砌为代表的锚喷支护技术^[41-44];③以刚性支架、钢管混凝土支架和桁架为代表的刚性强支护技术;④以注浆加固为主导的围岩改性技术^[45-48];⑤多重改进方法联合支护技术^[49-50]。

近年来在广大科研工作者和工程技术人员努力下,软岩巷道大变形灾害控制技术与方法虽然取得了长足进展,然而原有的支护技术仍不能满足千米深部巷道安全高效掘进对围岩稳定性的控制要求。一方面,现场支护技术的采用大多是经验性的,支护参数的选择主要依靠经验判断,未对不同变形等级采取针对性的支护措施,以实现支护成本和控制效果的最优化;另一方面,虽注意到“联合支护”的重要性和有效性,但未研究联合支护“分步实施”的科学性,对支护结构的分步实施对巷道大变形灾害孕育演化过程的控制作用机制认识不够深入,支护时机的选择过度依靠经验,各种支护手段不能在时间和空间上实现最优协同控制。

2.2 研究思考及进展

在深部高应力条件下进行巷道开挖,围岩表面的法向应力由开挖前的 20~30 MPa 卸荷至零,应力重分布在巷道围岩中形成周向应力集中,最大剪应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ 远远超过围岩的抗剪强度,导致围岩由表及里发生破坏。破裂区逐步向围岩内部发展,地应力峰值也由表及里逐步向围岩内部转移,并在围岩中形成破裂碎胀区、损伤扩容区和连续变形区。在此过程中,围岩产生大位移,巷道发生米级大变形灾害。不同的支护措施应根据围岩结构及应力峰值的发展演化在合理的时机精准介入,实现围岩稳定性的分步协同控制,从而有效控制巷道大变形灾害。

因此,通过第二章对破裂碎胀区和扰动应力场发展演化规律的监测,结合数值仿真,准确揭示深部巷道围岩结构和扰动应力场的演化特征,创新性提出了精准介入围岩结构与扰动应力场演化过程,多重手段分步协同的巷道米级大变形灾害控制理论和关键技术,形成了不同变形等级下的分步联合控制技术体系,实现深部高地应力开挖强扰动作用下巷道围岩时效损伤-破裂碎胀大变形的有效控制。

2.2.1 大变形灾害分步联合控制理论

围岩的稳定性既取决于围岩体的强度和变形性,又取决于其所受的应力状态。因此,控制围岩的稳定性应从改善围岩力学性质和应力状态 2 方面入手。

特别的,开挖前后围岩应力状态发生显著改变是深部巷道围岩由长期稳定状态转向非稳定状态的重要原因(图 8)。巷道开挖前,尽管围岩受到很高的地应力作用,但处于高围压状态,应力莫尔圆低于强度包络线,所以围岩处于稳定状态;而巷道开挖后,开挖卸荷导致近表围岩的侧向压力降为零,洞周应力重分布造成应力集中,远远超过强度包络线,围岩由开挖瞬时的快速破坏发展为渐进破坏。超出围岩强度的应力向深部转移,进而导致开挖扰动引起的二次应力影响区和围岩破裂损伤区进一步扩展。

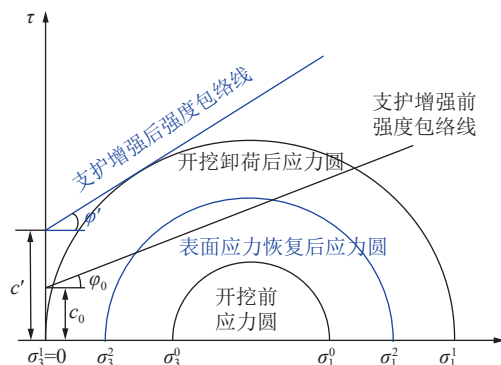


图 8 开挖支护前后围岩应力状态与强度的改变

Fig.8 Variation of stress state and rock strength before and after excavation and support

因此,要维护巷道的稳定,首要任务是在巷道开挖后尽快恢复和改善围岩的应力状态,将巷道开挖后近表围岩二向应力状态恢复到三向应力状态。但就目前的技术、经济因素考虑,单靠支护手段施加的围岩表面应力与原岩应力相比还是很很小(低于 1 MPa),远远达不到维护围岩稳定所需的水平,这就是传统的被动支护方式为何在深部巷道中难以奏效的原因所在。因此,还必须另辟蹊径:除了改善围岩的应力状态外,还需通过支护加固手段提高围岩的力学性质,增强围岩的自承载能力。基于以上分析,提出深部巷道围岩稳定性分步联合控制理论^[6,51]:

1) 巷道开挖后要在最短的时间内最大限度地恢复巷道自由面上的法向应力,改善因巷道开挖导致劣化的近表围岩的应力状态,从而提高围岩的非固有强度和变形模量,限制围岩沿巷道自由面法向和结构面法向的张开变形,称为“应力恢复”控制原理。

2) 要采用高强支护加固措施增强围岩,提高围岩固有抗剪强度,严格限制围岩沿原生裂隙和次生破裂滑移面的剪切变形,有效提高围岩抵抗高应力作用下的剪切破裂的能力,称为“围岩增强”控制原理。

3) 要对破裂区围岩进行固结,对损伤区围岩进行修复,恢复提高围岩的完整性和整体强度,称为“固结

修复”控制原理。

4) 将靠近巷道浅表一定范围内的高应力峰值向围岩深处转移(应力转移), 将锚注增强加固区与深层稳定的围岩联结成一体, 将整个围岩形成“三明治”整体结构, 实现围岩承载圈范围的扩大, 称为“应力转移-承载圈扩大”控制原理。

此外, 基于开挖卸荷应力场和围岩结构演化过程, 考虑多种支护手段的施作时机^[52-53], 通过不同支护措施精准介入, 充分发挥支架、预应力锚杆(索)、深浅孔层序注浆等多种支护手段在时间和空间上的协同耦合控制作用, 优化分步联合支护的控制效果, 实现巷道大变形灾害的有效控制(图 9)。

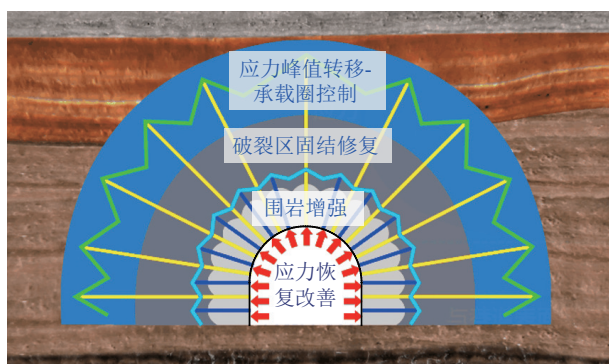


图 9 分步联合控制系统

Fig.9 Stepped combined support system

2.2.2 大变形灾害分步联合控制关键技术

基于精准介入围岩扰动应力场和变形破裂演化过程的碎胀大变形控制理念, 针对应力恢复、围岩增强、固结修复、应力转移-承载圈扩大 4 项控制原理, 提出了多重支护分步协同控制的关键技术。

为实现“应力恢复”, 补偿已卸荷的径向应力, 研发出“高强抗折喷层+高预应力联合作用”技术(图 10)。“内外双层网片+格栅拱架”的骨架结构使高强抗折喷层的整体刚度和强度均优于型钢支架, 并且与喷层更紧密地结合为一体更协调地变形, 避免巷道

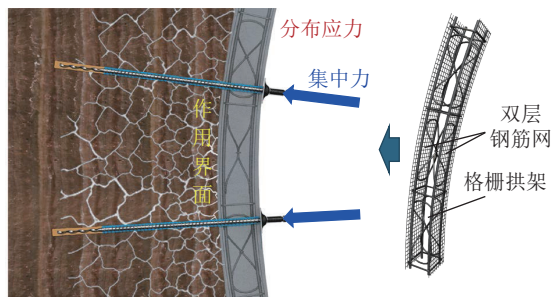


图 10 “高强抗折喷层+高预应力联合作用”技术

Fig.10 “Combined high-strength anti-bending spray layer + high prestressed anchor” technology

大变形时发生扭曲失效。同时可将高预应力锚固的集中力转化成分布应力, 恢复改善近表围岩应力状态, 提高围岩强度, 控制张拉变形破坏。

为实现“围岩增强”, 研发出可控预应力超强锚杆及系统布锚法, 在围岩中形成加固承载拱, 提高其抗剪强度, 控制剪切破裂。其中, 锚杆采用螺纹钢左旋无纵筋锚杆(左旋避免了锚固剂搅拌时溢出; 无纵筋使杆体与孔壁之间的间隙在各个方向保持均匀, 保证树脂锚固剂的黏结强度), 超强杆体能够充分满足高预应力对高锚固力的需求。同时, 还考虑对应力松弛的补偿, 设计了预应力控制与应力松弛补偿系统, 保障其长期有效的支护作用(图 11)。

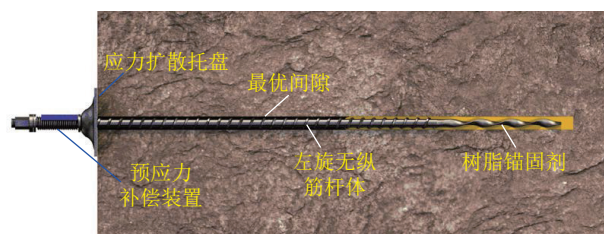


图 11 可控预应力超强锚杆

Fig.11 Controllable prestressed super strong anchor

为实现破裂区的有效“固结修复”, 通过有机-无机材料分子链耦联, 研发出经济型高强高韧注浆材料及分步注浆技术, 实现对裂隙网络的固结修复, 提高围岩完整性和整体强度, 使破碎岩体形成网格骨架结构进而提高了整体变形模量, 缓解了裂隙尖端的集中应力、增大了集中应力承载圈范围, 抑制了裂隙的扩展。该注浆材料抗拉/抗剪韧性比水泥基材料提高了 4~5 倍, 成本比树脂类注浆材料降低 80% 以上。此外, 通过对锚杆孔及周围裂隙岩体的注浆加固, 使端锚型或半长黏结型锚杆转变为全长锚固型, 进一步提高了预应力锚杆的锚固性能(图 12)。

为实现“应力转移-承载圈扩大”控制原理, 发明了新型无芯管预应力注浆锚索技术, 由 9 根高强钢绞线缠绕而成, 并在内部布设支撑环, 形成浆液流动通道实现后注浆功能。经过研究和实践, 当扰动应力峰值转移到距离洞周约 1 倍巷宽位置时为该技术精准介入的最佳时机, 可将巷道表面高强抗折喷层-围岩增强区-固结修复区-深层稳定区依次联结形成“三明治”整体结构, 扩大围岩承载圈, 实现巷道大变形灾害的有效控制和围岩的长期稳定(图 13)。

以上 4 项对策是有机结合的四位一体, 在落实到具体的支护加固措施时, 需要考虑到多种措施之间的相互作用, 既要实现围岩稳定的有效控制, 又要实现开挖支护的安全高效施工。例如, 高预应力超强锚杆

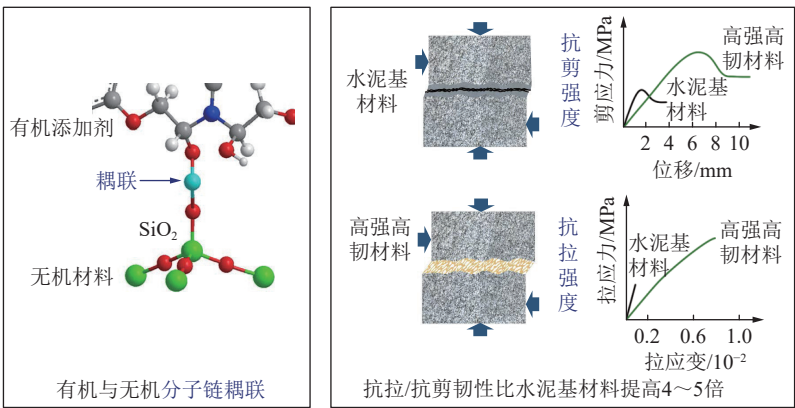


图 12 经济型高强高韧注浆材料

Fig.12 Economical high strength and high toughness grouting material

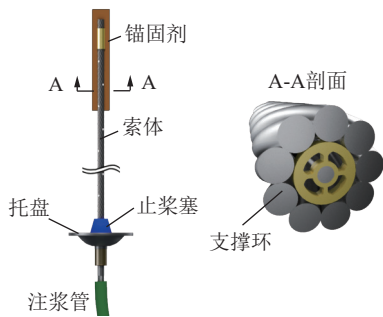


图 13 新型预应力注浆锚索

Fig.13 New prestressed grouting anchor cable

支护既能恢复改善围岩应力状态,又能有效地增强围岩;预应力锚索既能实现应力恢复、增强围岩,又能实现承载圈的扩大;合理的注浆加固时机,既能实现应力的有效转移和应力峰值的减弱,又能有效地固结修复破裂损伤的围岩。

2.2.3 大变形灾害分步联合控制标准体系

在工程应用中,应根据不同围岩类别和变形程度采取相应对策措施。对深部巷道Ⅲ级(相对收敛变形(变形量与巷道跨度的比值)<5%)、Ⅱ级(相对收敛变

形5%~10%)轻度大变形,采用应力恢复和围岩增强两项对策即能控制其稳定。

对Ⅲ级中等大变形灾害(相对收敛变形10%~25%),需要将应力状态恢复、围岩增强、破裂区固结修复三项对策全用上,组成“基本型”分步联合支护。对Ⅳ级严重大变形灾害(相对收敛变形25%~50%),需要在“基本型”分步联合支护基础上,进一步采取应力转移和承载圈扩大控制原理,采取措施使巷道表面应力状态得到更大程度的恢复与改善、围岩承载圈得到扩大,形成“标准型”分步联合支护。而对Ⅴ级极严重大变形灾害(相对收敛变形超过50%),还需在“标准型”分步联合支护基础上,通过超前支护措施对围岩进行预固结和预增强,并在围岩表面联合施加主动应力和被动应力,提高围岩表面的侧限压力,从而更大程度的改善围岩应力状态,形成“加强型”分步联合支护(表1)。

2.2.4 大变形灾变过程的FDEM模拟方法

研发了深部巷道大变形灾害分步联合控制机理数值模拟的WHU-FDEM软件平台,揭示了型钢支架

表 1 深部巷道碎胀大变形分步联合控制标准体系^[52-53]

Table 1 Stepped combined control standard of mine roadway large deformation^[52-53]

控制形式	基本型	标准型	增强型
变形等级	Ⅲ级	Ⅳ级	Ⅴ级
分步协同	应力恢复+围岩增强+固结修复	基本型+应力转移-承载圈控制	标准型+预固结预增强
支护措施			

和喷射混凝土衬砌、预应力锚杆/索和分步注浆等支护加固措施与围岩的相互作用机理, 阐明了预应力锚固通过块体镶嵌作用传递预应力作用的机理、注浆加固的浆液运移扩散和胶结机理, 预测不同变形等级下分步联合支护技术的控制效果, 优化各支护参数及最优施作时机, 实现大变形灾害的有效控制。

由于型钢支架和喷射混凝土衬砌与围岩间的相互作用较为简单, 其模拟方法较为成熟; 而对于预应力锚杆/索和分步注浆支护, 由于其与围岩的相互作用过程复杂, 目前尚缺乏能够表征作用机理的精确模拟方法, 现有的连续性分析方法和非连续分析方法中普遍采用的锚杆/索模拟的单元模型均不能准确表征预应力锚固的作用机理, 无法实现预应力锚固支护效果的模拟, 也没有准确表征注浆加固机理的模拟方法。因此, 基于 2.2.3 节破裂碎胀大变形灾变机理模拟的 FDEM 方法, 进一步开发了预应力锚固支护与注浆加固的精细化模拟算法, 探究多种支护手段对围岩稳定控制的协同作用机理。

锚杆(索)、锚固剂与围岩一样, 均采用实体建模(图 14)。在锚固支护发挥作用前, 锚杆/索和锚固剂的属性与围岩相同, 参与到围岩变形计算中。当锚固支护发挥作用后, 清除锚杆/索、锚固剂原有的应力, 赋予锚杆/索自身的本构模型及强度参数。此外, 将预应力换算为托盘上的均布荷载, 实现预应力锚固。有锚固剂部分锚杆/索与围岩通过四边形节理单元黏接(四边形节理单元力学参数和本构模型取为锚固剂的力学参数和本构模型), 二者为黏结关系; 无锚固剂部分锚杆/索与围岩间的四边形节理单元断开, 二者为接触关系, 据此实现端部锚固。在预应力锚固的实体建模中, 锚杆/索的预应力通过裂隙岩体的块体镶嵌作用传递, 这是准确表征预应力锚固作用机理最为关键

之处。

注浆加固算法包括浆液运移扩散过程和注浆胶结加固过程(图 15)。其中浆液的扩散模拟采用平板流模型, 并考虑了不同浆液的多态流模型(如牛顿流、宾汉姆流、幂律流)。同时提出了浆液与岩体的流固耦合算法, 考虑流固耦合作用下浆液运移、裂隙开闭、高压劈裂注浆导致的裂隙扩展等行为, 并提出了浆液运移扩散网络检索算法, 实时更新浆液运移网络; 注浆胶结加固过程利用 FDEM 黏聚力单元重新生成的方法来模拟。通过标记浆液的运移路径, 并激活被浆液填充的黏聚单元, 为其重新赋予新的强度参数, 以模拟浆液对裂隙的黏结修复作用。

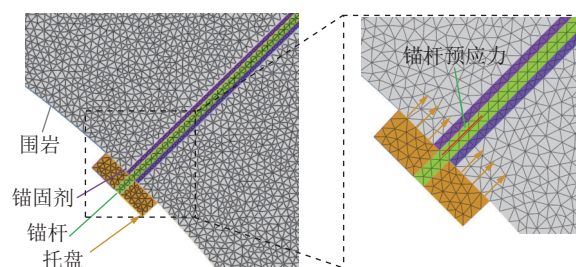


图 14 FDEM 精细化锚杆实体模型

Fig.14 Refined anchor solid model in FDEM

3 大变形灾变环境下 TBM 快速成巷技术

3.1 研究现状及挑战

煤炭开采, 掘进先行。我国深部煤矿巷道掘进量大, 在深部巷道大变形灾变环境下, 受围岩条件、掘进工艺及设备能力等因素的限制, 掘进速度和效率相对较低, 特别是深部大变形灾变环境下导致的巷道不断返修, 更加长了巷道开拓工程的准备周期, 造成采掘接续紧张。不适应的岩巷掘进技术已成为制约煤矿深部巷道开拓工程建设、矿井采场接替的关键因素。

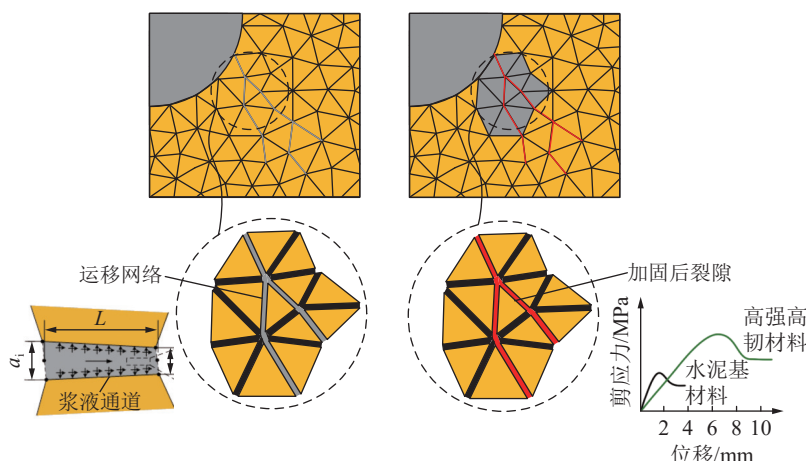


图 15 浆液运移扩散及注浆胶结加固算法

Fig.15 Grout migration and reinforcement algorithm

在有效控制深部巷道大变形灾害条件下保证掘进安全,提高掘进速度和巷道准备效率,解决“采掘失衡”的难题一直是煤矿掘进工程的研究热点与难点。

当前国内煤矿巷道掘进工艺多为钻爆法或综掘法^[54-55]。常规钻爆法即传统的打眼、放炮掘进方法,尽管其技术成熟,适用性强、适用范围广,但其成巷速度慢、安全性差、工作条件恶劣、劳动强度大、工程质量控制难度大,很难适应深部煤矿开采。而综掘法主要采用悬臂式掘进头掘进,其机械化程度高于钻爆法。淮南矿业集团、新集能源股份公司及平顶山煤业集团等企业先后引进了佳木斯煤机厂和德国 WAV300 和英国 MK3 型等重型悬臂式掘进机取得了良好的掘进效果^[54]。然而,综掘法断面成型质量差,巷道变形控制难。并且在地质条件复杂的岩层中极易“窝”,掘进效率低。现有的巷道掘进装备与技术严重制约煤矿安全生产和采掘接替,相应装备与技术难题亟待攻克。

全断面掘进机(TBM)集破岩、出渣、排渣、支护等功能于一身,自动化程度高、掘进速度快、施工安全性好,在山岭隧道、城市地铁中应用日臻成熟^[56-58]。近年来,陆续有多个矿区,如神东矿区补连塔煤矿斜井、淮南张集矿瓦斯抽采巷、陕西延长石油可盖煤矿斜井,先后尝试将 TBM 引入煤矿巷道掘进,取得了良好的工程效果^[59]。然而 TBM 在煤矿中的应用目前仍处于探索阶段。首先,之前采用 TBM 掘进的多为断面较小的瓦斯抽采巷,个别为埋深较浅的斜井,总体上围岩条件较好,与隧道中 TBM 施工区别不大。而在立井煤矿中,需将 TBM 各部件分块运输至井下空间狭窄的组装硐室进行组装调试,由于其主要部件尺寸、重量较大,立井的运输能力和井下大硐室的施工条件限制了 TBM 的应用^[60-61]。此外,深部巷道的围岩赋存环境和应力状态与浅部巷道存在根本差异,深部巷道大变形灾害多发,围岩稳定控制难^[54, 62]。因

此亟需发展适用于煤矿深部岩巷掘进的 TBM 施工技术与装备。

3.2 研究思考及进展

基于煤矿深部巷道特殊的工程地质条件和施工环境,针对 TBM 掘进过程中面临的掘进系统适应性设计、卡机灾害防控、信息智能感知与自适应决策控制等诸多技术挑战,研发出深部巷道大变形灾变环境下 TBM 安全高效掘进控制关键技术。发展了 TBM 在竖井煤矿入井、井下运输、组装、始发、掘进的整套施工工艺;建立了深部软弱地层挤压变形卡机灾害预测、预警及防控技术;开展了深部煤系复合地层 TBM 高效掘进性能预测和掘进参数智能决策技术等研究,实现了深部巷道 TBM 高效掘进。

3.2.1 TBM 矿井开拓系统优化布置与适应性设计

现有 TBM 系统适应性设计评价理论多适应于中浅部简单地层,而深部巷道 TBM 施工面临大件运输、原位组装拆卸、设备防爆、小半径转弯、大量排渣运输、不良地质超强预报处理、矿井开拓系统适应性等难题,因此首先进行 TBM 装备适应性设计与矿井开拓系统适应性设计研究。

1) 结合深井煤矿工程条件和全断面掘进机的技术特点,提出了煤矿深部巷道 TBM 模块化设计制造和井下狭窄空间运输、组装、拆解成套技术,发展了 TBM 井下始发、掘进和接收的关键技术,实现了 TBM 快速施工(图 16)。在设备掘进的同时,由胶带输送系统进行排矸,由预应力锚固钻机安装锚杆/索,由单轨吊进行人员、物料的辅助运输,实现了掘进、支护、排矸、辅助运输同步进行,确保巷道快速掘进。

2) 进行了煤矿深部巷道 TBM 各部件轻量化、小型化改进设计。研发了免焊接高强度分体式刀盘(图 17),满足井下运输安装要求,采用防松螺栓连接,避免井下焊接作业^[63];通过以上适应性设计,满足了掘进机刀盘在竖井煤矿井巷中的运输、拆装和施工对

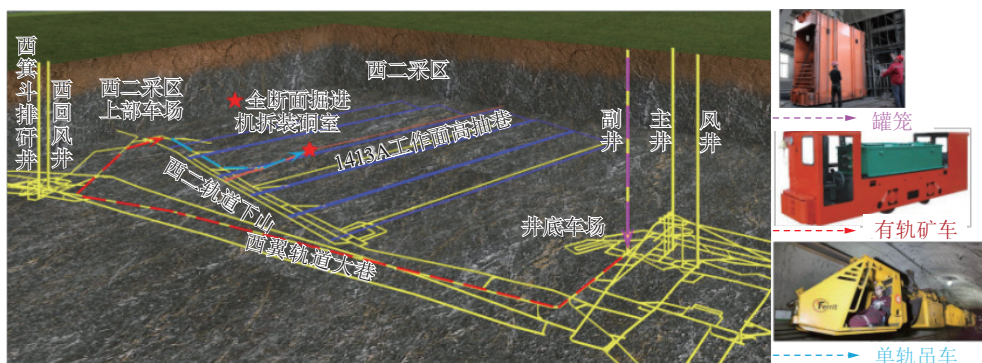


图 16 全断面掘进机部件运输路线

Fig.16 Transportation route map of TBM parts

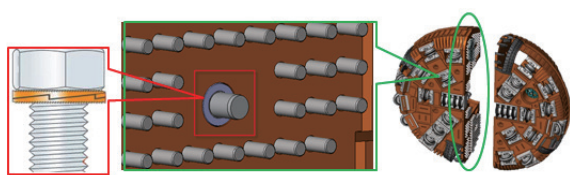


图 17 分体式刀盘+免焊接螺栓

Fig.17 Split cutterhead and welding-free bolts

设备尺寸、重量、防爆、拆装便捷性、装配稳定性和转速速度等方面要求。

3) 实现设备整机及各子系统的防爆设计。在 TBM 动力、电控、操作部分加装防爆外壳; 研发液压马达驱动棱镜、防爆工控机、防爆全站仪实现导向部

分的防爆功能; 将锚杆钻机滑动梁、拖链、注脂泵上的铝合金、塑料材料更换为不锈钢或碳素结构钢材料; 在滚刀刀座部位设置喷水系统, 降低滚刀温度; 将拖车结构平台设计为风筒与拖车合二为一的箱型结构, 形成嵌入式多功能通风除尘系统^[62]; 同时采用光谱式瓦斯浓度传感器实时监测工作面瓦斯浓度变化。通过以上设备整机及各子系统的防爆设计与制造, 首次实现整机防爆 (图 18)。

4) 小转弯半径、大坡度巷道 TBM 适应性设计 (图 19)。构建了 TBM 姿态控制与机构运动学模型, 确立了执行油缸与姿态关系; 提出了结构空间联接, 推进系统、皮带出渣系统设计; 采用“多分段、短机架、

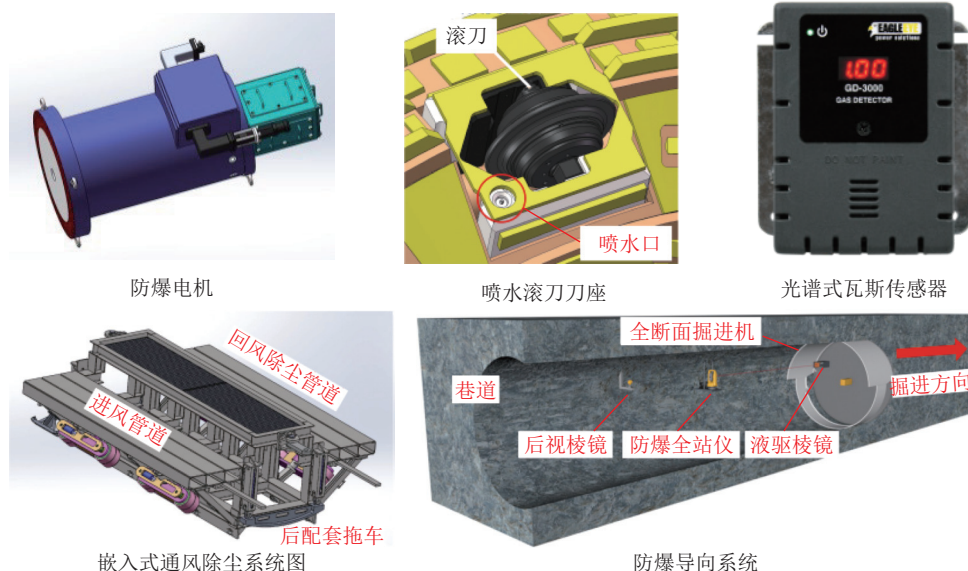
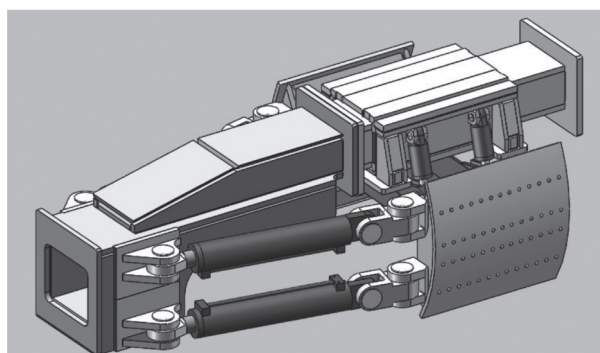


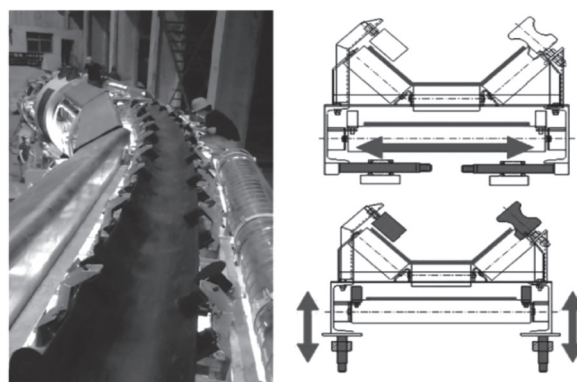
图 18 适应性设计实现整机防爆功能

Fig.18 Adaptable design for explosion-proof function



序号	名称	参数
1	主梁长宽高/mm	8 680×1 500×2 540
2	撑靴宽高/mm	3 300×2 336
3	撑靴油缸直径/mm	810
4	推进油缸直径/mm	360
5	推进油缸与撑靴油缸夹角变化范围/(°)	64.88~80.44
6	推进油缸长度及冲程/mm	2 830/1 650

推进系统设计



皮带机出渣系统设计

图 19 TBM 小半径转弯和大坡度巷道掘进针对性设计

Fig.19 Design of TBM small radius turn and highly inclined tunnel excavation

机架上下左右可调”的皮带机设计实现连续出渣;采用“旋转栈台+胶轮自卸车”的出渣及物料运输设计实现高效运输;采用“激光标+双目相机融合”的自动导向系统设计实现精准导向^[64]。

5) 不良地质超前探测及处理系统设计(图 20)。研发搭载了 TBM 超前数字钻机及岩石力学参数随钻感知系统和钻孔围岩结构数字化全景观测系统,实现了不良地质体的超前探测和不良地质体超前管棚支

护及注浆加固,实现不良地质体的超前处理。

6) TBM 掘进预应力锚固钻机适应性设计(图 21)。针对传统 TBM 无法垂直于洞壁施作预应力锚杆/索,不能实现高质量预应力锚固支护的弊端,研发出钻孔过程中自动接钻杆的法向预应力锚固钻机,在 L1 区配置 3~4 台预应力锚杆钻机, L2 区配置 2 台预应力锚索钻机,大大提高了锚固支护和掘进效率,实现了高质量预应力锚固支护。

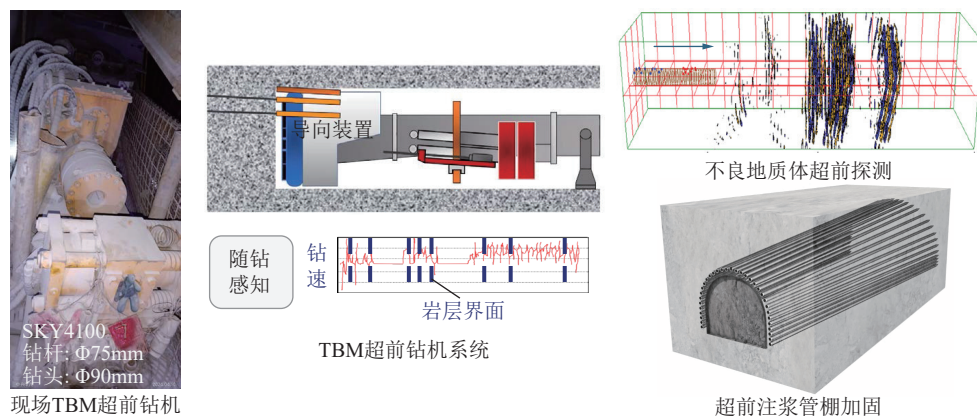


图 20 不良地质体的超前探测与超前加固系统

Fig.20 Advance detection and reinforcement system for poor geological structures

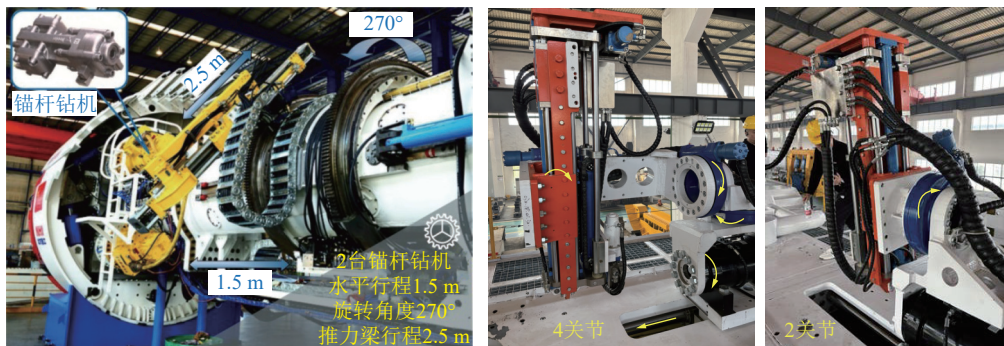


图 21 多关节全自由度法向预应力锚杆(索)钻机

Fig.21 Multi-joint and full-degree of freedom normal prestressed anchor (cable) drilling machine

3.2.2 TBM 挤压变形卡机灾害防控技术

TBM 在深部煤系复合地层中掘进,常常遇到破碎软弱地层,极易发生挤压变形卡机灾害,威胁设备安全,导致工期延误和巨大的经济损失。现有研究侧重于 TBM 卡机致灾机理和基于传统数值方法和变形监测手段来预测挤压变形卡机风险,然而其分析判别明显滞后,难以事前预警,通常待灾害发生后才被动采取脱困措施。对此,开展了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研究。

1) 揭示了软弱地层挤压变形卡机灾害孕育过程的破裂碎胀机理,发展了挤压变形卡机灾害预测模拟

的 FDEM 方法(图 22)。开展了深部巷道 TBM 掘进过程中围岩结构和扰动应力场演化规律的现场测试、物理与数值仿真研究,揭示了围岩破裂扩展形成的离散块体系统,以及块体间的剪切错动、张开分离和翻转运动导致的围岩破裂碎胀—大位移过程,从而对护盾形成挤压导致卡机的致灾机理。基于 FDEM 方法提出了碎胀变形时间效应、掌子面空间支撑效应等模拟算法,研发了基于 CUDA+OpenMP 架构的 GPU+CPU 并行计算程序,实现了卡机灾害精准预测^[56]。

2) 研发了“围岩位移线状激光雷达+挤压力阵列式传感”卡机监测预警系统(图 23),实现了卡机灾害实时预警。研发了基于线状激光雷达的护盾区域围

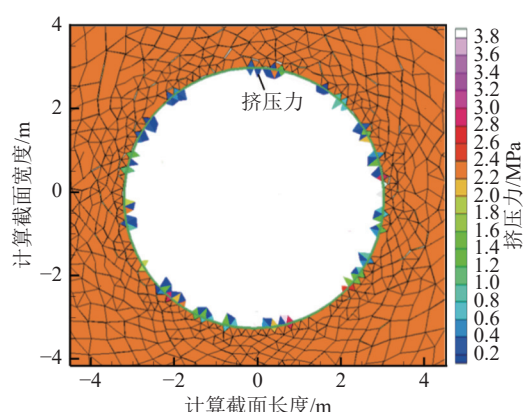


图 22 FDEM 卡机模拟预测方法

Fig.22 FDEM simulation method for TBM shield jamming

岩收敛变形监测技术, 并提出围岩纵向位移曲线 (LDP) 及岩-盾接触范围计算方法, 揭示了护盾区域围岩挤压变形时空演化规律, 突破了 TBM 快速掘进、护盾同步前移时狭小空间、多岩渣粉尘环境下的监测难题; 同时, 研发了一种用于测试围岩对 TBM 护盾挤压

力的微型压力传感器及其搭载方法, 提出了通过护盾外表面阵列式微型压力传感器直接测量与护盾内表面阵列式应变计间接测量相结合的护盾挤压力监测技术。进一步开发出基于网格覆盖法的护盾分布荷载的有限元反演方法, 获取了围岩对护盾挤压力的分布规律, 突破了 TBM 掘进过程中恶劣环境条件下挤压变形卡机监测与预警的技术瓶颈^[56]。

3) 研发出“超前钻精准探测+高压注浆超前加固+预应力锚喷及时支护+大变径扩挖+脱困模式掘进”的卡机灾害防控技术 (图 24), 实现了深部巷道 TBM 安全掘进。针对不同卡机风险等级, 基于深部巷道大变形灾害分步联合控制理论, 提出了以“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”为核心的卡机灾害分步联合控制技术 (图 25)。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。

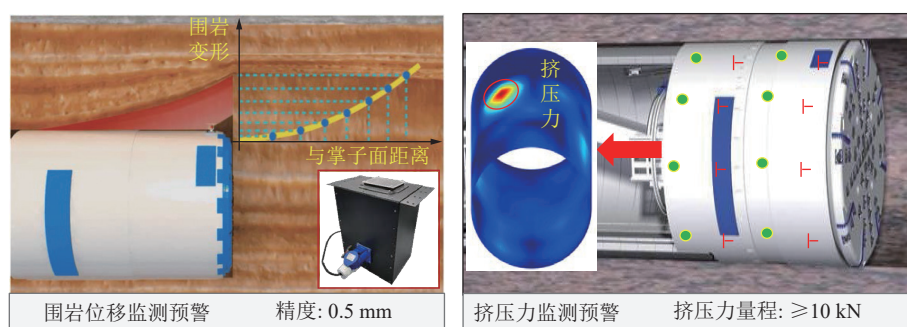


图 23 TBM 卡机灾害现场监测预警系统

Fig.23 On-site monitoring and early warning system of TBM shield jamming

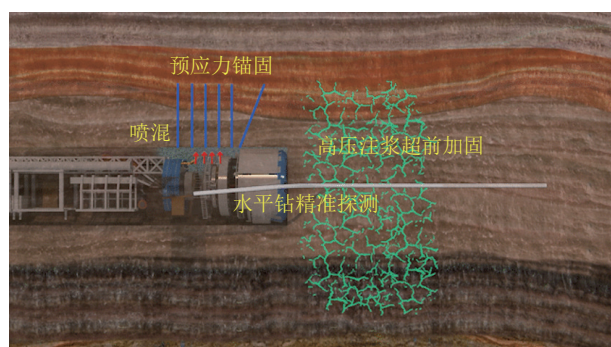


图 24 TBM 掘进大变形卡机灾害防控技术

Fig.24 Prevention and control technologies of TBM shield jamming disaster

3.2.3 TBM 掘进智能化决策控制技术

TBM 信息化、智能化掘进是 TBM 安全高效掘进的发展方向。当前复杂环境下 TBM 掘进技术缺乏对岩机作用信息的充分感知以及掘进过程中的智能决

策方法, 仍面临诸多技术难题。尤其是 TBM 掘进参数的选择通常依赖人为经验, 难以在地层变化或复杂地质条件下及时调整参数, 导致类似工程事故在不同项目中反复发生。为了解决这一问题, 开展了针对 TBM 掘进过程的岩机相互作用信息实时感知与智能决策控制研究, 旨在实现掘进过程的信息化与智能化决策控制。

1) 研发出 TBM 掘进恶劣环境下岩-机作用多源信息智能感知技术。提出了 TBM 掘进过程实时感知技术 (图 26), 涵盖机电液信息 (如推力、扭矩、贯入度、掘进速度等)、岩体状态信息 (如围岩应力、强度、破裂损伤、岩渣形态)、岩-机作用信息 (如刀具受力、刀具磨损、刀盘振动、护盾挤压力、护盾区围岩挤压变形)。成功搭载 TBM 掘进多源信息感知系统并实时采集数据, 进而建立了深部复杂地质条件下 TBM 掘进过程多源信息数据库。针对数据库中岩体参数信

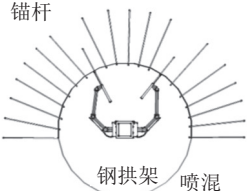
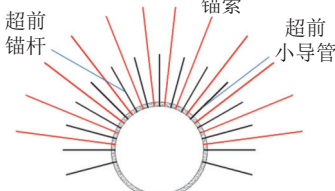
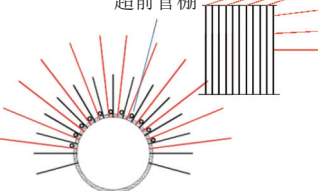
基本型	标准型	加强型
收敛应变2.5~5% (中等)	收敛应变5~10% (严重)	收敛应变>10% (非常严重)
小变径扩挖+“钢筋排、钢拱架、预应力锚杆/索+喷混”分步联合支护	大变径扩挖+脱困模式掘进+“超前预注浆+钢筋排+钢拱架、预应力锚杆/索+分步注浆+锚索”	钻爆法/人工开挖+TBM步进通过+加强型分步联合控制技术
 锚杆 钢拱架 喷混	 超前锚杆 锚索 超前小导管	 超前管棚

图 25 TBM 挤压变形卡机灾害分步联合控制技术

Fig.25 Stepped combined control technology for TBM shield jamming disaster

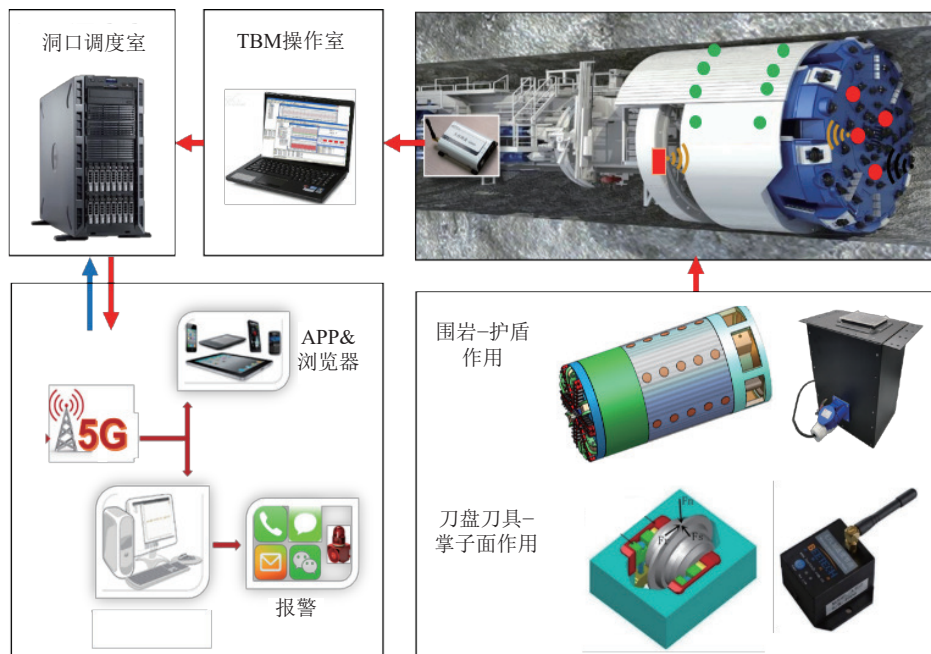


图 26 TBM 掘进岩—机作用信息智能监测平台

Fig.26 Intelligent monitoring platform of Rock-machine interaction during TBM excavation

息无法及时获取、掘进参数较少而机器运行参数较多的情况,提出了 AdaBoost-CART 和 SMBO-CatBoost 算法模型用以岩体信息实时感知,实现了基于 TBM 掘进参数和感知信息的掘进工作面岩体参数的实时反馈^[56]。

2) 研发出基于多源信息与多算法融合的 TBM 掘进性能预测和掘进参数智能决策技术。探究了 TBM 运行状态参数与岩体状态参数之间的互馈机制,建立了改进的多算法融合的岩体信息实时感知模型(强度、完整性等)和掘进控制参数预测模型(贯入度、刀盘转速等)(图 27)。提出了以破岩比能最小、掘进速率最大、卡机风险最小为目标函数的优化策略,并

设计了基于改进精英保留策略的非支配遗传算法 (DE-NSGAI) 与 TOPSIS 相结合的掘进控制参数动态最优化匹配算法,形成了 TBM 掘进控制参数自适应辅助决策智能控制技术^[64]。通过掌子面岩体信息、岩—机作用信息和 TBM 运行参数,实时预测掘进控制参数,显著提升了复杂地质条件下 TBM 掘进的智能化水平和效率。特别的,通过 TBM 与掌子面岩体的作用信息感知(如机电液信息、刀盘振动、刀具受力、刀具磨损等),可以判识前方岩体状态信息,为破岩比能、掘进速率优化决策提供依据;通过 TBM 护盾与围岩作用信息的感知(如护盾区围岩的纵向位移曲线和围岩对护盾的挤压力等),为卡机风险优化决策提供依据。

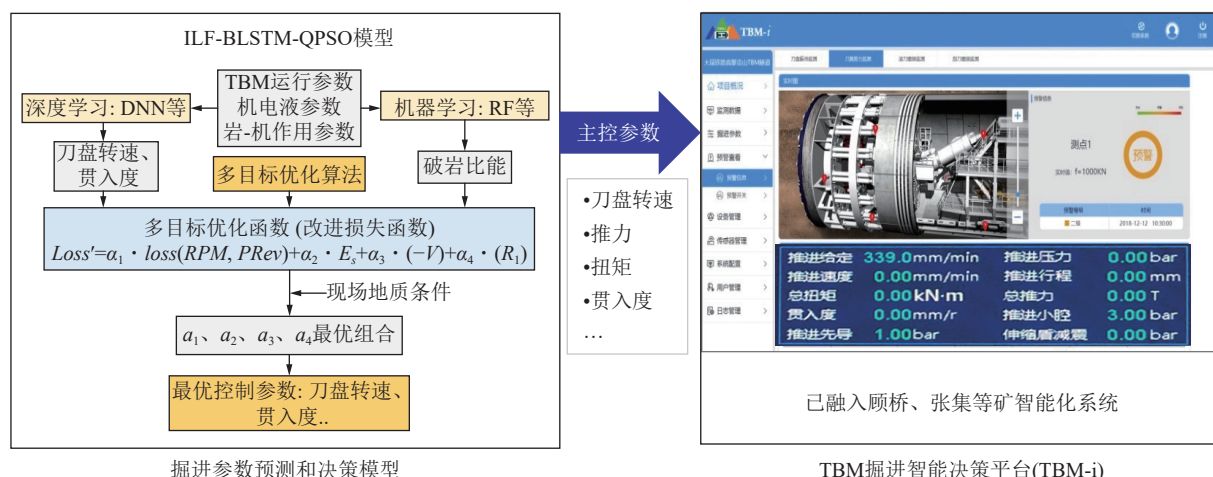


图 27 深部煤系地层 TBM 掘进参数智能决策技术

Fig.27 Intelligent decision-making technology for TBM excavation parameters in deep coal mines

4 结论与展望

笔者针对煤矿深部巷道大变形灾害控制面临的三大难题: ① 对深部巷道米级大变形灾变的机理认识尚不清晰; ② 缺乏适用于深部巷道大变形控制的理论与技术; ③ 缺乏适应大变形灾变环境的快速成巷技术, 开展了系统研究。主要结论如下:

1) 率先揭示了深部巷道米级大变形的围岩碎胀运动机理, 奠定了碎胀大变形控制的理论基础。利用高应力条件下破碎软岩的强流变性, 发明了地应力测试的流变应力恢复法, 实现了深部破碎软岩地应力测试的突破; 发明了多点位移一体化自动监测和弱反射光纤光栅大量程位移监测互补的技术方法, 实现了深部巷道百米范围围岩变形破裂过程的连续跟踪监测; 研发出深部巷道米级大变形孕灾机理连续-非连续耦合模拟的 FDEM 方法, 实现了全空间围岩破裂扩展、块体相互作用及运动过程的模拟表征。通过现场监测和数值模拟, 揭示出碎胀运动是米级大变形灾变的根本动因, 岩体破裂扩展形成的离散块体系统之间的错动、张开和翻转等大位移运动导致围岩碎胀产生米级大变形。

2) 建立了深部围岩分步联合控制理论与技术体系, 实现了碎胀大变形灾害的有效控制。基于精准介入围岩结构和扰动应力场演化过程的围岩控制理念, 提出了由“应力恢复、围岩增强、固结修复、应力转移和承载圈扩大”控制原理构成的深部围岩稳定性分步联合控制理论; 研发出深部巷道碎胀大变形分步联合控制关键技术, 包括内外双层网片+格栅拱架骨架结构的高强抗折喷层、可控预应力超强锚杆及系统布锚法、经济型高强高韧注浆材料及分步注浆技术、新型无芯管预应力注浆锚索技术; 根据不同的围岩类别采

取不同的对策措施, 建立了深部巷道碎胀大变形分步联合控制标准体系, 实现了围岩与支护耦合、多重手段分步协同控制。

3) 研发出深部巷道大变形灾变环境下 TBM 安全高效掘进关键技术, 解决了深部矿井采掘接续难题。提出了 TBM 掘进矿井开拓系统优化布置与适应性设计方法, 研发出超前数字钻机、法向预应力锚固钻机等深部巷道 TBM 掘进适应性子系统, 提升了 TBM 对深部煤系地层的掘进适应性; 发展了深部巷道 TBM 掘进挤压变形卡机灾害防控技术, 发明了“线状激光雷达+阵列式挤压传感”卡机监测预警系统, 研发出“超前钻精准探测+高压注浆超前加固+预应力锚喷及时支护+大变径扩挖+脱困模式掘进”的卡机灾害防控技术, 实现了深部巷道 TBM 安全掘进; 研发出 TBM 掘进恶劣环境下岩-机作用多源信息智能感知技术, 研发出基于多源信息与多算法融合的 TBM 掘进性能预测和掘进参数智能决策技术, 实现了深部巷道 TBM 高效掘进。

上述研究成果有效解决了典型矿区深部巷道米级大变形灾害控制难题, 实现了深部大变形灾变环境下的快速成巷, 解决了采掘接替难题。然而, 随着煤矿开采深度的不断增加, 更多工程难题日益显现, 更多新理论、新技术、新设备亟需提出, 更深入的科学研究和现场应用工作也亟待开展。

参考文献(References):

- [1] 谢和平. 深部岩体力学与开采理论研究进展[J]. 煤炭学报, 2019, 44(5): 1283-1305.
XIE Heping. Research review of the state key research development program of China: Deep rock mechanics and mining theory[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(5): 1283-1305.
- [2] 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): 2803–2813.
- 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): 2803–2813.
- [3] 袁亮. 煤炭精准开采科学构想[J]. 煤炭学报, 2017, 42(1): 1–7.
- YUAN Liang. Scientific conception of precision coal mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(1): 1–7.
- [4] 胡社荣, 彭纪超, 黄灿, 等. 千米以上深矿井开采研究现状与进展[J]. 中国矿业, 2011, 20(7): 105–110.
- HU Sherong, PENG Jichao, HUANG Can, et al. An overview of current status and progress in coal mining of the deep over a kilometer[J]. *China Mining Magazine*, 2011, 20(7): 105–110.
- [5] 何满潮, 景海河, 孙晓明. 软岩工程力学[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [6] 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.
- [7] 康红普. 我国煤矿巷道围岩控制技术发展 70 年及展望[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(1): 1–30.
- KANG Hongpu. Seventy years development and prospects of strata control technologies for coal mine roadways in China[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2021, 40(1): 1–30.
- [8] 王虹. 我国综合机械化掘进技术发展 40a[J]. 煤炭学报, 2010, 35(11): 1815–1820.
- WANG Hong. The 40 years developmental review of the fully mechanized mine roadway heading technology in China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2010, 35(11): 1815–1820.
- [9] 王国法, 王虹, 任怀伟, 等. 智慧煤矿 2025 情景目标和发展路径[J]. 煤炭学报, 2018, 43(2): 295–305.
- WANG Guofa, WANG Hong, REN Huaiwei, et al. 2025 scenarios and development path of intelligent coal mine[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(2): 295–305.
- [10] ISRM. Squeezing rocks in tunnels [J]. *ISRM News Journal*, 1995, 2: 44–49.
- [11] 陈宗基. 地下巷道长期稳定性的力学问题[J]. 岩石力学与工程学报, 1982, 1(1): 1–20.
- CHEN Zongji. The mechanical problems for the long-term stability of underground galleries[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1982, 1(1): 1–20.
- [12] 孙钧, 朱合华. 软弱围岩隧洞施工性态的力学模拟与分析[J]. 岩土力学, 1994, 15(4): 20–33.
- SUN Jun, ZHU Hehua. Mechanical simulation and analysis of behaviour of soft and weak rocks in the construction of a tunnel opening[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1994, 15(4): 20–33.
- [13] SAARI K. Analysis of plastic deformation (squeezing) of layers intersecting tunnels and shafts in rock [D]. Berkeley: University of California, 1982.
- [14] AYDAN Ö, AKAGI T, KAWAMOTO T. The squeezing potential of rocks around tunnels; Theory and prediction[J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1993, 26(2): 137–163.
- [15] MAHMUTOGLU Y, VARDAR M. Effects of inelastic volume increase on fractured rock behaviour[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2003, 62(2): 117–121.
- [16] 靖洪文, 李世平, 牟宾善. 零围压下岩石剪胀性能的试验研究[J]. 中国矿业大学学报, 1998, 27(1): 19–22.
- JING Hongwen, LI Shiping, (MOU/MU) Binshan. Experimental study on the dilatancy nature of rocks under zero confining pressure[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 1998, 27(1): 19–22.
- [17] 于德海, 彭建兵. 三轴压缩下水影响绿泥石片岩力学性质试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(1): 205–211.
- YU Dehai, PENG Jianbing. Experimental study of mechanical properties of chlorite schist with water under triaxial compression[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(1): 205–211.
- [18] 徐卫亚, 杨圣奇, 杨松林, 等. 绿片岩三轴流变力学特性的研究 (I): 试验结果[J]. 岩土力学, 2005, 26(4): 531–537.
- XU Weiya, YANG Shengqi, YANG Songlin, et al. Investigation on triaxial rheological mechanical properties of greenschist specimen (I): Experimental results[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2005, 26(4): 531–537.
- [19] 刘钦, 李术才, 李利平, 等. 软弱破碎围岩隧道炭质页岩蠕变特性试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(S2): 21–28.
- LIU Qin, LI Shucai, LI Liping, et al. Experimental study of carbonaceous shale creep characters of weak broken surrounding rock tunnel[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(S2): 21–28.
- [20] 黄兴, 刘泉声, 康永水, 等. 砂质泥岩三轴卸荷蠕变试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(S1): 2653–2662.
- HUANG Xing, LIU Quansheng, KANG Yongshui, et al. Triaxial unloading creep experimental study of sandy mudstone[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35(S1): 2653–2662.
- [21] 朱建明, 徐秉业, 岑章志. 岩石类材料峰后滑移剪胀变形特征研究[J]. 力学与实践, 2001, 23(5): 19–22.
- ZHU Jianming, XU Bingye, CEN Zhangzhi. Study on the deformation mechanisms of sliding dilation of post-failure rocks[J]. *Mechanics and Engineering*, 2001, 23(5): 19–22.
- [22] 赵启峰, 张农, 彭瑞, 等. 大断面泥质巷道顶板离层突变垮冒演化相似模拟实验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(6): 1107–1114.
- ZHAO Qifeng, ZHANG Nong, PENG Rui, et al. Similarity simulation experimental study on abrupt collapse of roof separation in large cross-section argillaceous roadway[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2018, 35(6): 1107–1114.
- [23] 顾金才, 顾雷雨, 陈安敏, 等. 深部开挖洞室围岩分层断裂破坏机制模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(3): 433–438.
- GU Jincai, GU Leiyu, CHEN Anmin, et al. Model test study on mechanism of layered fracture within surrounding rock of tunnels in deep stratum[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2008, 27(3): 433–438.
- [24] 李利平, 李术才, 赵勇, 等. 超大断面隧道软弱破碎围岩渐进破坏过程三维地质力学模型试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(3): 550–560.
- LI Liping, LI Shucai, ZHAO Yong, et al. 3d geomechanical model for progressive failure progress of weak broken surrounding rock in super large section tunnel[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(3): 550–560.

- [25] 张智慧, 潘一山. 深部巷道破坏分区破裂规律三维相似材料实验[J]. 煤炭学报, 2015, 40(12): 2780–2786.
ZHANG Zhihui, PAN Yishan. Three-Dimensional similar material experimental study on zonal disintegration of deep tunnel failure[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(12): 2780–2786.
- [26] 周小平, 张永兴. 卸荷岩体本构理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [27] 孙钧, 潘晓明. 隧道软弱围岩挤压大变形非线性流变力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(10): 1957–1968.
SUN Jun, PAN Xiaoming. Research on large squeezing deformation and its nonlinear rheological mechanical characteristics of tunnel with weak surrounding rocks[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(10): 1957–1968.
- [28] STERPI D, GIODA G. Visco-plastic behaviour around advancing tunnels in squeezing rock[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2009, 42(2): 319–339.
- [29] DEBERNARDI D, BARLA G. New viscoplastic model for design analysis of tunnels in squeezing conditions[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2009, 42(2): 259–288.
- [30] 陈卫忠, 田云, 王学海, 等. 基于修正[BQ]值的软岩隧道挤压变形预测[J]. 岩土力学, 2019, 40(8): 3125–3134.
CHEN Weizhong, TIAN Yun, WANG Xuehai, et al. Squeezing prediction of tunnel in soft rocks based on modified [BQ][J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(8): 3125–3134.
- [31] 卢兴利, 刘泉声, 苏培芳. 考虑扩容碎胀特性的岩石本构模型研究与验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(9): 1886–1893.
LU Xingli, LIU Quansheng, SU Peifang. Constitutive model of rocks considering dilatancy-bulking behaviour and its calibration[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(9): 1886–1893.
- [32] 康永水, 耿志, 刘泉声, 等. 我国软岩大变形灾害控制技术与方法研究进展[J]. 岩土力学, 2022, 43(8): 2035–2059.
KANG Yongshui, GENG Zhi, LIU Quansheng, et al. Research progress on support technology and methods for soft rock with large deformation hazards in China[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(8): 2035–2059.
- [33] 张芳, 刘泉声, 张程远, 等. 流变应力恢复法地应力测试及装置[J]. 岩土力学, 2014, 35(5): 1506–1513.
ZHANG Fang, LIU Quansheng, ZHANG Chengyuan, et al. Geostress measurement using rheological stress recovery method and its equipment[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(5): 1506–1513.
- [34] 蒋景东. 深部软弱围岩流变应力恢复法地应力测试与分析方法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2016.
JIANG Jingdong. Research on in-situ stress measurement with rheological stress recovery method in deep soft rock [D]. Wuhan: Wuhan University, 2016.
- [35] 张程远, 张静, 刘泉声, 等. 非接触式围岩内部位移量测系统的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(S1): 3481–3488.
ZHANG Chengyuan, ZHANG Jing, LIU Quansheng, et al. Experimental study on non-contact measurement system of internal displacement of surrounding rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018, 37(S1): 3481–3488.
- [36] 刘流. 深部巷道围岩变形实时监测与支护时机精准介入决策方法[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2021.
LIU Liu. Real-time monitoring of surrounding rock deformation in deep roadways and accurate intervention decision method of supporting time [D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2021.
- [37] 邓鹏海, 刘泉声. 高应力软岩隧道破裂碎胀米级大变形机理研究[J]. 中国公路学报, 2023, 36(8): 225–239.
DENG Penghai, LIU Quansheng. Study on meter-level large deformation mechanism of soft rock mass around tunnel with high *in situ* stress[J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(8): 225–239.
- [38] TAN X J, CHEN W Z, LIU H Y, et al. A combined supporting system based on foamed concrete and U-shaped steel for underground coal mine roadways undergoing large deformations[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 68: 196–210.
- [39] 张金松, 唐雨轮, 周长伟, 等. 软岩巷道中三维网壳衬砌支护技术研究与应[J]. 安徽理工大学学报(自然科学版), 2023, 43(6): 73–81.
ZHANG Jinsong, TANG Yulun, ZHOU Changwei, et al. Research and application of three-dimensional mesh-shell lining support technology in soft rock roadway[J]. Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science), 2023, 43(6): 73–81.
- [40] LIU D J, ZUO J P, WANG J, et al. Large deformation mechanism and concrete-filled steel tubular support control technology of soft rock roadway-a case study[J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 116: 104721.
- [41] 蒋敬平, 黄庆显, 魏夕合, 等. 深井软岩巷道高强全锚注支护机理与技术应用[J]. 煤矿安全, 2016, 47(10): 33–35.
JIANG Jingping, HUANG Qingxian, WEI Xihe, et al. High strength and complete bolting-grouting support mechanism and technology application in deep soft rock roadway[J]. Safety in Coal Mines, 2016, 47(10): 33–35.
- [42] SHREEDHARAN S, KULATILAKE P H S W. Discontinuum-equivalent continuum analysis of the stability of tunnels in a deep coal mine using the distinct element method[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2016, 49(5): 1903–1922.
- [43] 何满潮, 杜帅, 宫伟力, 等. 负泊松比锚杆/索力学特性及其工程应用[J]. 力学与实践, 2022, 44(1): 75–87.
HE Manchao, DU Shuai, GONG Weili, et al. Mechanical characteristics and engineering applications of bolt/cable with negative poisson's ratio[J]. Mechanics in Engineering, 2022, 44(1): 75–87.
- [44] 陶文斌, 吴平平, 陈铁林, 等. 基于锚杆拉拔试验优化锚固承载特性研究[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(9): 10–19.
TAO Wenbin, WU Pingping, CHEN Tielin, et al. Experimental research on optimization of anchorage bearing characteristics based on bolt pull-out test[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(9): 10–19.
- [45] 刘泉声, 雷广峰, 卢超波, 等. 注浆加固对岩体裂隙力学性质影响的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(S1): 3140–3147.
LIU Quansheng, LEI Guangfeng, LU Chaobo, et al. Experimental study of grouting reinforcement influence on mechanical properties of rock fracture[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(S1): 3140–3147.

- [46] 张海波, 狄红丰, 刘庆波, 等. 微纳米无机注浆材料研发与应用[J]. 煤炭学报, 2020, 45(3): 949–955.
ZHANG Haibo, DI Hongfeng, LIU Qingbo, et al. Research and application of micro-nano inorganic grouting materials[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(3): 949–955.
- [47] 何满潮, 王博, 陶志刚, 乔亚飞, 肖颖鸣. 大变形隧道钢拱架自适应节点轴压性能研究(双语出版)[J]. 中国公路学报, 2021, 34(5): 1–10.
HE Man-chao, WANG Bo, TAO Zhi-gang, QIAO Ya-fei, XIAO Ying-ming. Axial Compression Behavior of Adaptive Steel Arch Joint for Large-deformation Tunnels(in English)[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(5): 1–10.
- [48] 李桂臣, 杨森, 孙元田, 等. 复杂条件下巷道围岩控制技术研究进展[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(6): 29–45.
LI Guichen, YANG Sen, SUN Yuantian, et al. Research progress of roadway surrounding strata rock control technologies under complex conditions[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(6): 29–45.
- [49] 刘泉声, 卢兴利. 煤矿深部巷道破裂围岩非线性大变形及支护对策研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(10): 3273–3279.
LIU Quansheng, LU Xingli. Research on nonlinear large deformation and support measures for broken surrounding rocks of deep coal mine roadway[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(10): 3273–3279.
- [50] 姜鹏飞, 康红普, 王志根, 等. 千米深井软岩大巷围岩锚架充协同控制原理、技术及应用[J]. 煤炭学报, 2020, 45(3): 1020–1035.
JIANG Pengfei, KANG Hongpu, WANG Zhigen, et al. Principle, technology and application of soft rock roadway strata control by means of “rock bolting, U-shaped yielding steel Arches and back filling” in synergy in 1 000 m deep coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(3): 1020–1035.
- [51] 袁亮, 薛俊华, 刘泉声, 等. 煤矿深部岩巷围岩控制理论与支护技术[J]. 煤炭学报, 2011, 36(4): 535–543.
YUAN Liang, XUE Junhua, LIU Quansheng, et al. Surrounding rock stability control theory and support technique in deep rock roadway for coal mine[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(4): 535–543.
- [52] 康永水, 刘泉声, 刘滨, 等. 深部岩巷精准介入围岩结构的分步联合支护技术探索[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(11): 2682–2693.
KANG Yongshui, LIU Quansheng, LIU Bin, et al. Investigation of combined step-wised support technology for precise intervention of surrounding rock structure for deep rock roadway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(11): 2682–2693.
- [53] 深部岩巷支护技术规程, 淮南矿业(集团)有限责任公司企业标准[S]. 2009.
- [54] 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 1000 km and the key rock mechanics problems[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(12): 2006–2013.
- [55] 王虹, 陈明军, 张小峰. 我国煤矿快速掘进 20a 发展与展望[J]. 煤炭学报, 2024, 49(2): 1199–1213.
WANG Hong, CHEN Mingjun, ZHANG Xiaofeng. Twenty years development and prospect of rapid coal mine roadway excavation in China[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(2): 1199–1213.
- [56] 唐永志, 唐彬, 程桦, 等. 煤矿复杂地层 TBM 掘进巷道新型装配式支护结构工程实践[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(9): 68–75.
TANG Yongzhi, TANG Bin, CHENG Hua, et al. New prefabricated support structure for TBM tunneling in complex strata of coal mines: Engineering practice[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(9): 68–75.
- [57] LIU Q S, HUANG X, GONG Q M, et al. Application and development of hard rock TBM and its prospect in China[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 57: 33–46.
- [58] 王彦武. 塔山矿主平峒 TBM 掘进技术初探[J]. 山西水利, 2004, 20(6): 57–59.
- [59] HUANG Xing, LIU Quansheng, SHI Kai, et al. Application and prospect of hard rock tbm for deep roadway construction in coal mines[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 73: 105–126.
- [60] 陈馈, 孙振川, 李涛. TBM 设计与施工[M]. 北京: 人民交通出版社, 2018.
- [61] 本书编纂委员会. 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.
- [62] 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.
- [63] 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.
- [64] 刘泉声, 潘玉丛, 余宏淦, 等. 深部金属矿山巷道 TBM 掘进技术应用现状及研究进展[J]. 有色金属(矿山部分), 2024, 76(6): 25–41.
LIU Quansheng, PAN Yucong, YU Honggan, et al. Application status and research progress of TBM tunnelling technology in deep metal mine roadways[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2024, 76(6): 25–41.