

松软多节理巷道变形破坏机制及联合支护技术

Deformation and Damage Mechanism and Joint Support Technology for Deep Soft Multi-sectional Roadways

王东红

(陕西铁道工程勘察有限公司, 陕西 西安 710000)

摘要: 为解决松软多节理巷道大变形问题, 以象山矿 21501 运输巷道为工程实例, 通过现场勘测及钻孔窥视, 分析了巷道围岩变形破坏机制及塑性区范围。基于三软煤层巷道围岩控制理论, 提出了“超前管棚 + 长锚索 + W 钢带/工字钢 + 双层网”优化支护方案, 通过数值模拟和工程实践验证支护方案的可行性。结果表明: 采用优化支护方案后, 巷道两帮及顶底板收敛速度得到有效降低, 巷道两帮及顶底板收敛量分别为 133.2、175.5 mm, 保证了松软多节理巷道的长期稳定。

关键词: 松软多节理; 大变形; 钻孔窥视; 围岩控制; 长期稳定

中图分类号: TD353 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2024) 04-0097-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.04.017

WANG Donghong

(Shaanxi Railway Engineering Survey Co., Ltd., Xi'an 710000, China)

Abstract: In order to solve the problem of large deformation of soft and multi-jointed roadway, 21501 transport roadway of Xiangshan Mine is taken as an engineering example, and the deformation and damage mechanism of the roadway perimeter rock and the range of plastic zone are analysed through on-site investigation and drilling peeping. Based on the theory of three-soft coal seam roadway rock control, the optimised support scheme of "over-head pipe shed + long anchor cable + W steel belt/I-beam + double-layer mesh" is proposed, and the feasibility of the support scheme is verified through numerical simulation and engineering practice. The test results show that after adopting the optimised support scheme, the convergence speed of the two gangs and the top and bottom plates of the roadway is effectively reduced, and the convergence amount of the two gangs and the top and bottom plates of the roadway is 133.2 mm and 175.5 mm respectively, which ensures that the loose and soft multi-jointed roadway can be protected. This ensures the long-term stability of the loose and soft multi-jointed roadway.

Keywords: soft multi-sectional; large deformation; borehole peeping; surrounding rock control; long-term stability

0 引言

岩石巷道广泛存在于地下空间, 如采矿工程、土木工程、隧道工程等。对于深部岩土工程, 有些

巷道会从浅部硬岩巷道逐渐转变为深部软岩巷道。因此, 软岩支护问题已成为亟待解决的重大安全问题^[1-2]。在工程中, 严重的挤压变形会发生在巷道的各个方向, 会导致围岩支护结构的不稳定和破坏^[3-4]。

目前, 在很多煤矿掘进过程中, 巷道围岩呈现出高应力、膨胀、破碎、流变、松散、强风化蚀变及松软等软岩特征, 导致巷道的掘进围岩控制及后期维护难度加大, 工程量大, 存在安全隐患。巷道

作者简介: 王东红 (1987—), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 岩土工程勘察工作。

收稿日期: 2023-06-12

岩土力学

围岩发生变形破坏时必然造成支护设备损坏或者失效,出现片帮、底鼓和顶板岩体冒落等矿压现象,有时甚至可以诱发煤岩动力灾害的发生,造成人员伤亡财产损失。近年来众多学者对松软多节理巷道围岩变形机制和支护技术进行了研究。高占峰^[5]采用理论分析、数值模拟及现场试验对深部松软围岩巷道变形特征及防控技术进行了研究,确定了煤柱侧向切顶+注浆加固并对破碎区域补充锚索强化支护的防控技术;毕颖等^[6]采用数值分析研究了高应力膨胀破碎软岩大变形巷道控制机理,确定了“喷-锚-注-喷-壳”支护方案;任硕等^[7]通过理论分析及数值计算研究了矿松散煤层破碎顶板巷道变形破坏机理,确定了高预紧力锚杆锚索+喷浆支护的协同控制技术。

基于此,以象山矿为工程背景,对巷道的变形破坏机制进行了分析,并基于三软煤层巷道围岩控制理论,提出了“超前管棚+长锚索+W钢带/工字钢+双层网”的优化支护方案。通过数值模拟和现场试验证明,所提出的优化支护方案可以有效控制巷道围岩的大变形。研究可为三软煤层的稳定性控制提供指导和参考。

1 工程概况

象山矿2号煤层埋深超过1000 m,顶底板属于软岩,松软破碎,裂隙发育,受构造运动变化影响大,应力较为集中,21501运输巷道开挖后其围岩变形速率快,变形量大且变形持续时间长,巷道断面收缩严重,围岩整体稳定性差,难以维护且围岩控制成本高,给煤矿的安全高效生产造成极大的困扰,严重影响矿井的生产进度。

2 巷道变形破坏机制

2.1 巷道岩性情况

2号煤层顶板10 m范围内与锚杆支护直接相关的煤岩体岩性主要为泥岩、砂质泥岩和细粒砂岩。顶板岩层浅部存在多处裂隙,完整性相对较差;顶板深部岩体完整性较好;巷帮岩体完整性较好。煤层顶底板情况见表1。

2.2 巷道原支护情况

21501运输巷道断面形状为矩形,断面尺寸为净

表1 煤层顶底板情况

Table 1 Coal seam top and bottom conditions

顶底板名称	岩层名称	平均厚度/m	岩性特征
基本顶	细粒砂岩	3.7	局部为粗砂岩,中厚-厚层状,
直接顶	泥岩	5.4	属极软弱岩泥质岩类,性脆
直接底	砂质泥岩	5.8	泥质岩类,性脆,平坦,贝壳状断口

宽×净高为5000 mm×3700 mm,原支护方式采用“锚网索喷+钢护板”的联合支护。锚索规格为 $\phi 21.6 \times 8200$ mm,间排距为1600 mm×1200 mm;锚杆采用 $\phi 22 \times 2400$ mm的无纵筋螺纹钢,间排距为800 mm×800 mm,锚杆托盘配合使用规格为400 mm×260 mm×4 mm钢护板,巷道顶板两帮分别使用6根、10根锚杆;钢筋网采用 $\phi 6$ 钢筋编织,规格为1800 mm×700 mm;同时巷道围岩的表面喷射厚度50 mm的C20混凝土。运输顺槽原支护方案如图1所示。

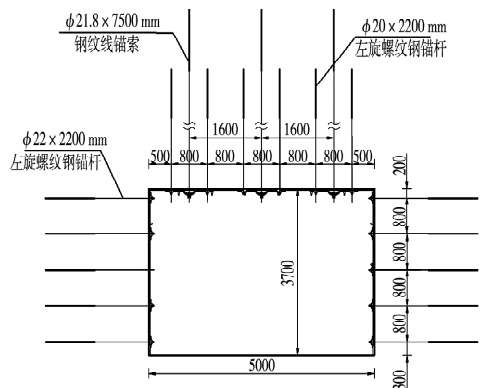


图1 运输顺槽原支护方案

Fig. 1 Original support scheme for transport chute

2.3 原支护巷道变形特征

在运输顺槽掘进施工过程中,巷道变形破坏十分严重,巷道顶板离层、网兜、以及锚杆失效现象频繁发生,在巷道的部分段落发生钢筋网开裂、漏矸(煤)、鼓包等现象,对此采取了木垛架棚支护及液压支柱支护等加固措施,如图2所示。

2.4 巷道变形破坏的影响因素

开挖后围岩稳定性受多种因素影响,特别是软岩巷道,影响其围岩稳定性的因素会更多,其中主要的影响因素有:巷道围岩性质、围岩地应力、采动影响、支护方案等。具体内容如下:

(1) 围岩性质。围岩性质是影响硐室围岩稳定性的重要因素之一。该煤层暴露面呈粉末状,抗压强度为0.2 MPa,沾水后表现出泥化的特征,人手很

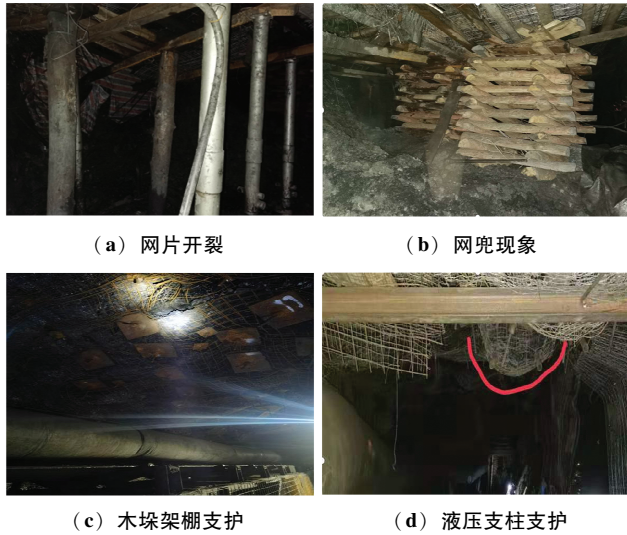


图 2 巷道变形破坏及支护现场图

Fig. 2 Site plan of deformation damage and support of the roadway

容易剥离煤粉，属于松软煤层。通过对巷道围岩进行钻孔窥视可发现，巷道侧帮在 0.5~3.0 m 的范围围岩破裂十分严重，并出现塌孔现象；巷道顶板在 2.5~7.0 m 范围的围岩发生破裂；在 7.0~8.0 m 范围，煤体出现泥化的现象。

(2) 围岩地应力。地应力主要由自重应力和构造应力组成，在工程实践中，主要是地应力导致巷道围岩发生变形破坏。在同一地区，岩体所处的深度越大自重应力越大，巷道围岩稳定性越差，支护越困难。同时，构造应力主要以水平应力为主，且水平应力大于自重应力，深井巷道处于较高的构造应力场环境中。

(3) 采动影响。临近巷道和研究巷道的开采对深井巷道围岩的稳定性影响很大。研究巷道受到附近动压影响的范围及程度，并对此采取围岩控制措施，使得巷道能够保持长久稳定，减少巷道使用过程中的维修成本，节约企业成本。

(4) 支护方式不适用。由于巷道围岩松软破碎，原支护设计方案不能满足围岩变形要求。继续采用传统的支护方案，显然不能适应深部巷道地压与围岩变形特性，需要采取新的支护方案。

3 三软煤层巷道围岩控制理论

为了研究的方便，通常将圆形巷道代替矩形巷道进行研究。轴对称圆形巷道理想弹塑性分析—Kastner 方程，基本假设和解题条件：深埋圆形平巷（巷道

埋深 $429 \text{ m} > 20r_a$ ）、无限长；原岩应力各向等压；围岩为理想弹塑性体。

(1) 基本方程

根据岩体力学弹塑性理论计算轴对称圆形巷道围岩的弹性应力状态， σ_r 为径向应力， σ_θ 为切向应力， C_1 、 C_2 为积分常数。

塑性区：轴对称问题的平衡方程为（根据弹塑性力学理论，围岩体内部任意点的平衡方程）^[8]：

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0 \quad (1)$$

弹性区：积分常数待定的弹性应力解为^[8]：

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_r \\ \sigma_\theta \end{array} \right\} = C_1 \pm \frac{C_2}{r^2} \quad (2)$$

(2) 边界条件

弹性区：

外边界：当 $r \rightarrow \infty$ 时， $\sigma_r = p_0$ （在无穷远处的径向应力等于岩体的初始应力 p_0 ）；内边界（与塑性区的交界面）： $r = R_p$ （塑性区半径）^[9]。

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_r^e \\ \sigma_\theta^e \end{array} \right\} = C_1 \pm \frac{C_2}{R_p^2} \quad (3)$$

塑性区：

外边界（弹塑性区交界面）： $r = R_p$ （上标“e”、“p”分别表示弹、塑性区的量）。

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_r^p = \sigma_r^e \\ \sigma_\theta^p = \sigma_\theta^e \end{array} \right. \quad (4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_r = 0 \\ \sigma_\theta = p_1 \end{array} \right. \quad (5)$$

不支护时，巷道壁面的径向应力为 0， $\sigma_r = 0$ ；有支护反力时， $\sigma_r = p_1$ 。

(3) 求解

由上述方程式联立求解，可得^[10-11]：

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_r^p = C \cot \varphi \left[\left(\frac{r}{r_a} \right)^{\frac{2(1-\varepsilon)}{\varepsilon}} - 1 \right] \\ \sigma_\theta^p = C \cot \varphi \left[\frac{2 - \varepsilon}{\varepsilon} \left(\frac{r}{r_a} \right)^{\frac{2(1-\varepsilon)}{\varepsilon}} - 1 \right] \end{array} \right. \quad (6)$$

岩土力学

$$\left. \begin{matrix} \sigma_r^e \\ \sigma_\theta^e \end{matrix} \right\} = p_0 \pm \frac{C_2}{r^2} \quad (7)$$

弹性区应力为^[10-11]:

$$\left. \begin{matrix} \sigma_r^e \\ \sigma_\theta^e \end{matrix} \right\} = p_0 \left(1 + \frac{R_p^2}{r^2} \right) \pm C \cot \varphi \left[\left(\frac{r}{r_a} \right)^{\frac{2(1-\varepsilon)}{\varepsilon}} - 1 \right] \frac{R_p^2}{r^2} \quad (8)$$

塑性区半径为^[12]

$$R_p = r_a \left(\frac{\varepsilon p_0}{C \cot \varphi} + \varepsilon \right)^{\frac{\varepsilon}{2(1-\varepsilon)}} \quad (9)$$

式中: p_0 为岩体初始应力, MPa; r_a 为洞室半径, m; C 为内聚力, MPa; φ 为内摩擦角, °。

由此可见, 塑性区半径的大小不仅与原岩应力、内聚力、内摩擦角有关, 而且与巷道半径也有关。

根据圆形洞室的应力变化情况求矩形巷道开挖力变化情况, 需要将矩形巷道转化为与之等效的圆形洞室。假设巷道的宽为 $2B$, 高为 $2H$, 则等效圆形巷道最大半径为 $r_0 = \sqrt{B^2 + H^2}$, 将等效 r_0 替代 r_a 即可。由工程概况可知, $2B = 4.9$ m, $2H = 3.7$ m, 则 $r_0 = 3.1$ m, 再将岩层力学参数代入式 (9) 可得塑性区半径 $R_p = 8.6$ m。

4 巷道支护方案数值模拟

4.1 模型的建立

采用有限差分数值计算软件 FLAC 3D 进行数值模拟计算, 对巷道围岩的受力和位移大小进行分析。所建模型尺寸为 80 m (宽) × 60 m (长) × 6 m (厚), 模型的四周使用位移边界条件, 巷道底板固定水平位移和竖向位移, 模型上表面使用自由边界条件。

4.2 支护方案优化

综合现场围岩变形等实测和基于理论的分析, 提出“超前管棚 + 长锚索 + W 钢带/工字钢 + 双层网”的支护方案, 并对比无支护状态与原支护方案下巷道围岩稳定性。优化方案具体如下:

顶板支护: 支护方式为超前管棚 + 长锚索 + W 钢带/工字钢 + 双层网, 超前管棚采用直径 50 mm 钢管, 设计间距 200 mm, 长度 3000 mm, 搭接长度 600 mm, 锚索直径为 21.6 mm, 长度 10 m, 锚索间

排距为 1000 mm × 1000 mm, 锚索支护配合使用 W 钢带和工字钢, 二者交替使用, 其中 W 钢带厚度为 4 mm, 宽为 280 mm; 托顶煤掘进时, 使用超前管梁; 巷道顶板下沉区段架设工字钢棚。巷道表面喷射强度为 C20, 厚度为 50 mm 的混凝土。

巷帮支护: 锚杆采用 $\phi 22 \times 2400$ mm 的无纵筋螺纹钢加工, 锚固剂使用 Z2360 锚固剂 2 条, 托盘尺寸为 150 mm × 150 mm × 8 mm, 锚杆间排距为 800 mm × 800 mm, 锚杆配套球形垫圈和减摩垫圈, 托盘后加钢护板, 钢护板规格为 400 mm × 260 mm × 4 mm; 金属网支护参数同原支护方案。

4.3 支护方案模拟分析

利用模拟软件分别对未支护、原支护方案、优化方案的应力分布、位移分布和塑性区分布进行数值模拟。

4.3.1 巷道围岩应力分布

提取巷道两帮和顶底板通过巷道中心两条测线上水平应力值, 绘制出图 3 与图 4 中所示的巷道两帮和顶底板水平应力分布曲线。

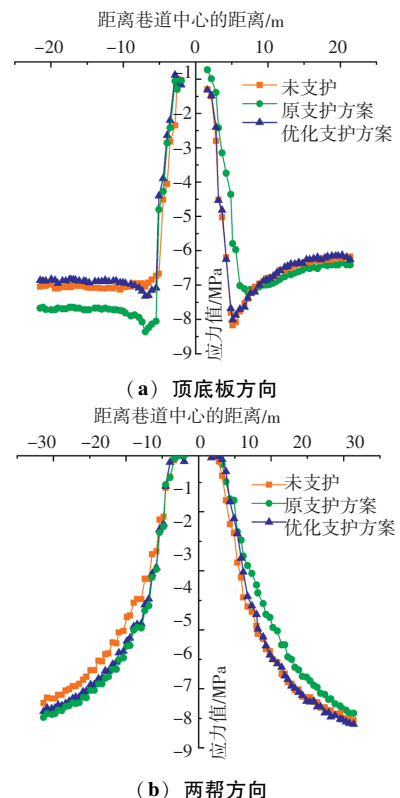


图3 不同支护方式下巷道围岩水平应力变化曲线
Fig. 3 Horizontal stress variation curve under different support methods

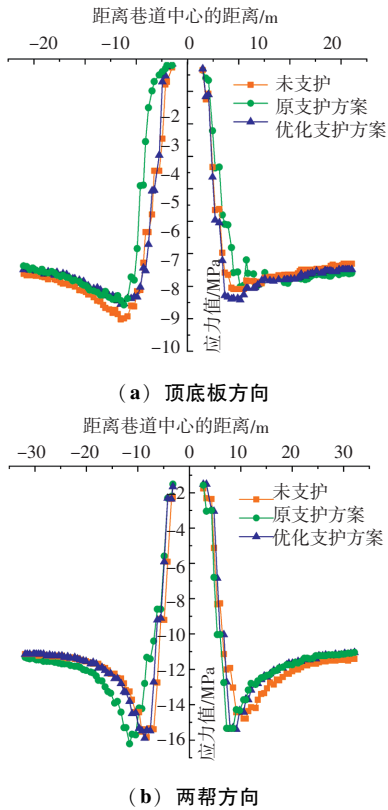


图4 不同支护方式下巷道围岩垂直应力变化曲线
Fig.4 Vertical stress variation curves of the roadway under different support methods

由图3可知,不同支护方案应力增长快慢不同,原支护和优化方案相对于未支护来看,峰前应力增速相对较快,应力达到峰值处的位置离巷道中心处更近,发生塑性破坏范围也就相应减小,因此,优化方案支护效果相对较好。

由图4可知,与未支护和原支护方案相比,巷道围岩在优化方案支护状态下,其应力峰值有所提高,且其应力增加速率明显较大,应力峰值区离巷道距离更短,改善了围岩应力状态,使巷道围岩趋于稳定。

4.3.2 巷道围岩位移及塑性区分布特征

由图5可知,不同支护条件下的巷道顶底板垂直位移随着远离巷道中心渐渐减小,最后趋于稳定直到零位移,其中位移的最大值出现在巷道顶板的右上方和底板的左下方。原支护方案与未支护状态相比,顶板下沉量由原来的340 mm减少到206 mm,减少了39.4%,底鼓量由原来的230 mm减少到202 mm,减少了12.1%。优化方案与未支护状态相比,顶板下沉量由原来的340 mm减少到120 mm,减少了64.7%,底鼓量由原来的230 mm减少到

130 mm,减少了43.4%。

不同支护方案下巷道围岩塑性区范围差别较大,未支护状态下的塑性区比较大,顶板、两帮和底板的塑性区半径分别为3.82、2.54和3.72 m;原支护方案的顶板、两帮和底板的塑性区半径分别为2.64、2.03和2.52 m;优化支护方案下,顶板的塑性区半径减少到1.28 m,两帮的塑性区半径减少到0.47 m,底板的塑性区半径减少到0.72 m,塑性区范围明显减小,表明优化方案对巷道围岩变形起到了一定的控制效果。

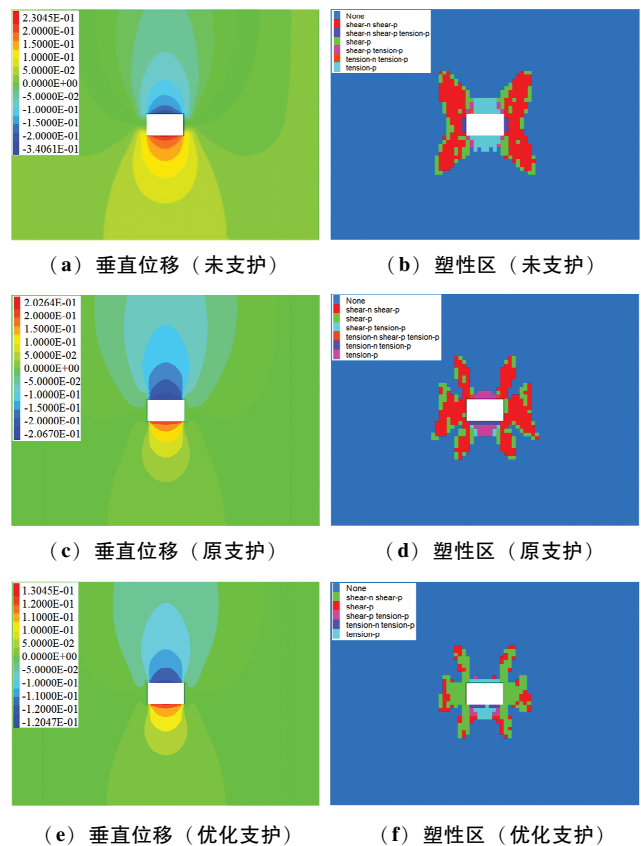


图5 不同支护条件下的巷道围岩位移分布及塑性区分布
Fig.5 Displacement distribution and plasticity zone distribution of roadway perimeter rock under different support conditions

5 现场试验

在21501运输巷道内布置监测断面,监测巷道围岩的变形情况。

由图6可知,巷道支护施工初期,巷道收敛速度的峰值为21.7 mm/d,在巷道采用优化支护后,巷道两帮的收敛速度为5.5 mm/d,下降了45.5%;巷道顶板收敛速度下降到5.1 mm/d, (下转第122页)

道桥技术

社, 2015.

- [10] 铝合金人行天桥技术规程: T/CECS 471—2017 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2017.
- [11] 建筑钢结构球型支座: GB/T32836—2016 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [12] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.

- [13] 城市桥梁设计规范: CJJ 11—2011 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [14] GUO X, ZHANG J, ZHU S, et al. Damping characteristics of single-layer aluminum alloy reticulated spatial structures based on improved modal parameter identification method [J/OL]. Thin-Walled Structures, 2021, 164: 107822.

(上接第 101 页)

下降了 46.7%; 底板隆起的速度下降到 4.9 mm/d, 下降了 46.9%。巷道两帮及顶底板变形量分别为 133.2、175.5 mm。采用优化支护方案后, 巷道断面的收敛量明显减少, 巷道的收敛速度也得到有效抑制。

(2) 现场试验得出, 采用优化支护方案后, 巷道围岩收敛速率减小, 收敛量均在允许变形范围内, 有效控制了软煤层巷道围岩的稳定性。

参 考 文 献

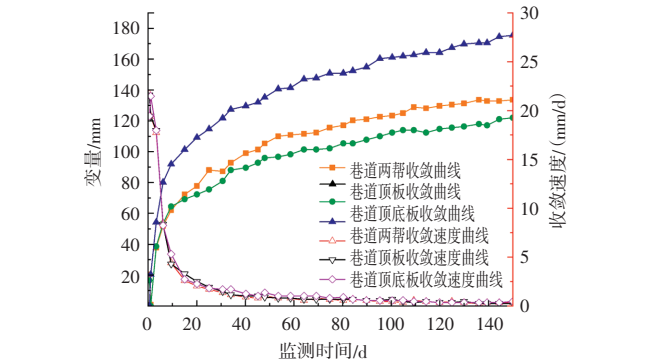


图 6 巷道的收敛量和收敛速度曲线

Fig. 6 Convergence volume and convergence velocity curves for the lane

6 结 论

通过现场实验、理论分析和数值模拟, 分析了深部松软多节理巷道失稳机理, 并在软岩巷道稳定性控制理论分析的基础上, 提出了“超前管棚 + 长锚索 + W 钢带/工字钢 + 双层网”优化支护方案, 得出以下主要结论:

(1) 基于三软煤层巷道围岩控制理论, 提出了“超前管棚 + 长锚索 + W 钢带/工字钢 + 双层网”优化支护方案, 并通过数值模拟验证了该方案的合理有效性。

- [1] 任硕, 李中伟, 周文凯. 煤矿松散煤层破碎顶板巷道支护技术研究 [J]. 能源与环保, 2022, 44 (12): 39-44.
- [2] 张新蕾. 基于岩体力学参数的巷道锚杆支护应力数值模拟 [J]. 粉煤灰综合利用, 2023, 37 (2): 39-43.
- [3] 袁超. 深部巷道围岩变形破坏机理与稳定性控制原理研究 [D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2017.
- [4] 王伟. 巷道围岩稳定性分析及锚杆支护效果评价研究 [D]. 西安: 西安科技大学, 2016.
- [5] 高占峰. 开采扰动下深井松软岩层巷道围岩变形特征及防控技术研究 [J]. 能源与环保, 2023, 45 (8): 263-271.
- [6] 毕颖, 赵政文. 冲击高应力膨胀破碎软岩大变形巷道控制机理研究 [J]. 煤矿安全, 2022, 53 (7): 174-180.
- [7] 任硕, 李中伟, 周文凯. 煤矿松散煤层破碎顶板巷道支护技术研究 [J]. 能源与环保, 2022, 44 (12): 39-44.
- [8] 余伟健, 王卫军, 黄文忠, 等. 高应力软岩巷道变形与破坏机制及返修控制技术 [J]. 煤炭学报, 2014, 39 (4): 614-623.
- [9] 张勇, 谢铨, 孙特, 等. 深埋软岩巷巷道底鼓破坏机制及控制对策研究 [J]. 煤炭工程, 2022, 54 (12): 50-55.
- [10] 朱乐章, 黄北海, 丁可. 极松软易破碎综放面巷道“降钻锚注平”支护技术 [J]. 煤炭工程, 2023, 55 (3): 47-51.
- [11] 李景涛, 段燕伟. 基于多级锚固承载层的软岩巷道支护技术研究 [J]. 黑龙江科技大学学报, 2023, 33 (4): 542-547.
- [12] 刘远. 重复动压下煤巷群围岩分区加固方法研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2020, 34 (2): 130-135.