

师皓宇,圣逸文,张巨川,等.大松动圈巷道锚杆索支护作用机理及控制技术[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2026,45(4): 385-391.DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20260136

Shi Haoyu, Sheng Yiwen, Zhang Juchuan, et al. Mechanism and control technology of bolt and cable support in large broken zone roadways[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2026, 45(4): 385-391. DOI: 10.11956/j.issn.1008-0562.20260136

大松动圈巷道锚杆索支护作用机理及控制技术

师皓宇¹, 圣逸文¹, 张巨川², 马宏军²

(1. 应急管理大学 矿山安全学院, 河北 廊坊 101601; 2. 开滦(集团)有限责任公司 唐山矿业分公司, 河北 唐山 063012)

摘 要: 针对唐山矿0294工作面切眼扩巷后围岩松动圈超出锚杆支护范围的问题, 基于蝶形塑性区理论, 结合数值模拟分析, 揭示切眼在掘进与扩巷过程中围岩破坏范围的动态扩展特征; 基于松动圈内岩体应力状态, 建立锚固体失稳判别准则, 阐明岩体承载能力与破碎程度以及应力状态之间的数学关系。研究结果表明: 岩块尺寸对锚杆和锚索的承载能力具有重要影响; 根据0294工作面切眼掘进及扩巷期间的围岩应力分布规律可知, 巷道顶板具有较高的水平应力, 且松动圈内岩体仍具备较高的承载能力, 据此提出“2.4 m锚杆+6.5 m注浆锚索+10.5 m长锚索”的联合支护方案。研究结论为深部大松动圈巷道锚杆支护提供理论支撑。

关键词: 锚杆索支护; 破碎煤岩体; 承载能力; 松动圈; 联合支护

中图分类号: TD353

文献标志码: A

文章编号: 1008-0562(2026)04-0385-07

Mechanism and control technology of bolt and cable support in large broken zone roadways

Shi Haoyu¹, Sheng Yiwen¹, Zhang Juchuan², Ma Hongjun²

(1. College of Safety Engineering, University of Emergency Management, Langfang 101601, China;

2. Tangshan Mining Branch Company, Kailuan (Group) Limited Liability Corporation,

Tangshan 063012, China)

Abstract: Aiming at the problem that the loose circle of surrounding rock exceeds the range of bolt support after the open-off cut of 0294 working face in Tangshan Mine, this paper reveals the dynamic expansion characteristics of the surrounding rock failure zone during the excavation and widening. This study utilizes the butterfly plastic zone theory combined with numerical simulation analysis. Based on the stress state of rock mass in the loose circle, the criterion of anchorage instability is established, and the mathematical relationship between the bearing capacity of rock mass and the degree of fragmentation and the stress state is clarified. The results show that the size of rock mass has an important influence on the bearing capacity of anchor bolt and anchor cable. According to the stress distribution law of surrounding rock during the excavation and expansion of 0294 working face, roof of the roadway has high horizontal stress, and the rock mass in the loose circle still has high bearing capacity. Based on this, a combined support scheme of “2.4 m bolt+6.5 m grouting anchor cable+10.5 m long anchor cable” is proposed. The research conclusions provide theoretical support for bolt support in deep large loose circle roadway.

Keywords: bolt and anchor support; broken coal rock mass; carrying capacity; excavation damaged zone; combined support

0 引言

随着煤炭资源开采深度的不断增加, 以及机

械化、智能化水平的持续提高, 巷道断面尺寸显著增大^[1-4]。大断面巷道处于深部高应力、强扰动等复杂地应力环境中, 围岩变形失稳问题日益突

收稿日期: 2026-03-26 修回日期: 2026-04-28 接受日期: 2026-05-12 责任编辑: 朱含露

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (52394191; 52474097)

作者简介: 师皓宇 (1979-), 男, 内蒙古乌兰察布市人, 博士, 教授, 主要从事矿山压力与岩层控制方面的研究。E-mail: shihaoyu2000@163.com

出^[5],对巷道稳定性及煤矿安全高效开采构成严峻挑战^[6-7]。

围绕围岩失稳机理与支护控制方面已开展大量研究。在围岩塑性区破坏机理层面,马念杰等^[8]、Liang等^[9]、李季等^[10-11]揭示了圆孔围岩塑性区形态演化规律,即随着侧压系数的增大,塑性区逐渐由圆形向椭圆形、蝶形演化。王卫军等^[12]提出针对大塑性区的可接长锚杆支护方案,有效降低了深部巷道冒顶风险。在锚固体系稳定性层面,靖洪文等^[13-14]通过深部巷道物理模拟实验,揭示了不同支护方式下锚固-围岩协同承载的全过程特征。李建忠等^[15]认为,破碎岩体锚固失稳源于拱下岩体支撑效应弱化与锚杆作用衰减共同诱发的压力拱结构失稳。在支护技术创新层面,马念杰等^[16]研发的柔性锚索技术可满足深部大变形巷道的控制需求。He等^[17]提出深部开挖补偿方法与围岩控制关键技术。白璐等^[18]构建由全长预应力强力锚杆、中空注浆锚杆及强力锚索组成的组合支护方案。王书刚等^[19]提出深部动压巷道的“卸-固协同控制”理念,该理念能够有效保障动静载条件下巷道的协同稳定。当前研究在围岩破坏机制与支护技术方面取得了丰硕成果。然而,针对深部高应力环境,尤其是经历掘进与二次扩巷强扰动后的大断面巷道,若松动圈范围显著超出常规锚杆锚固深度,现有锚杆支护技术尚缺乏深入的定量分析与严谨的力学依据。

基于此,以唐山矿 0294 工作面切眼为工程背景,研究围岩的破坏特征与松动圈承载能力,构建锚固体系失稳判据,并结合数值模拟方法研究掘

进与扩巷过程中应力场演化规律。通过优化锚杆与锚索支护参数,提出“锚杆+短锚索+长锚索”联合支护方案,为深部复杂地质条件下巷道稳定控制提供理论与技术参考。

1 工程背景

唐山矿 0294 工作面位于南五下采区,北部为 0292 已采工作面,东部为 9282 已采工作面,南部无采掘工程。0294 工作面 8 号、9 号煤层平均厚度约为 10.0 m,中间含 1~2 层碳质泥岩,单层厚度为 1.2~3.2 m;其中 8 号煤层厚度约为 4.5 m,9 号煤层厚度约为 5.5 m。唐山矿地应力以水平压应力为主,最大主应力方位为 260°(即北东东-南西西走向),最大主应力与最小主应力比值为 1.58,该方向地应力作用较强。0294 工作面切眼沿 9 号煤层底板连通 0294 风道与溜子道,掘进长度为 158 m。切眼施工分两次成巷:初次掘进断面为 4.3 m×3.0 m,贯通后进行扩巷,扩巷后断面为 8.4 m×3.0 m。0294 工作面布置见图 1,巷道围岩力学参数及岩层结构见表 1。

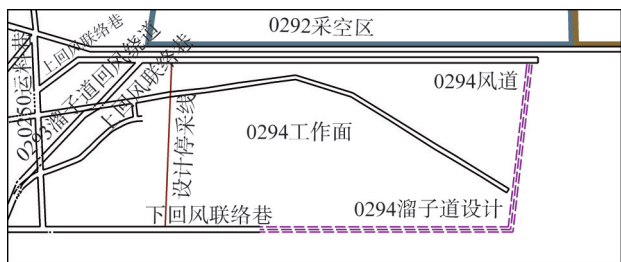


图1 0294工作面布置

Fig.1 Layout of 0294 working face

表 1 巷道围岩石力学参数

Tab.1 Rock mechanical parameters for surrounding rocks of roadway

岩层名称	岩层类别	厚度/m	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	抗拉强度/MPa	内聚力/MPa	内摩擦角/(°)
老顶	中砂岩	2.1	13.25	4.30	2.70	2.86	39
直接顶	粉砂岩	6.0	19.60	11.80	3.02	4.83	41
夹石	碳质泥岩	1.2~3.2	4.83	3.52	1.86	2.18	36
直接底	泥岩	2.4	6.35	3.62	2.73	3.41	39
老底	泥岩	4.5~8.0	2.83	1.60	2.21	2.30	38
煤	煤	10.5	1.83	1.32	1.24	1.44	35

2 切眼围岩破坏特征

圆形巷道围岩塑性区计算力学模型见图 2。在

双向不等压且考虑偏应力的条件下,郭晓菲等^[20]推导出圆形巷道蝶形破坏边界隐式方程为

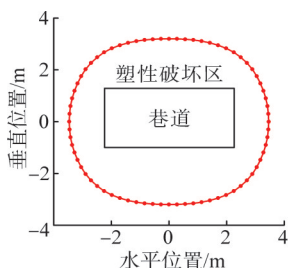
$$\begin{aligned} &9(1-A)^2B^8 + \{-6(1-A)[2(1-A) - (D-1-A)\cos 2\theta]\}B^6 + \{2(1-A)^2(\cos 4\theta + 2\cos^2 2\theta \cos^2 \varphi) + \\ &(1+A)[1+A+4(1-A)\cos 2\theta - 2D] + [D-2(1-A)\cos 2\theta]^2\}B^4 + [4(1-A)(1+A+E)\sin^2 \varphi \cos 2\theta - \\ &4(1-A)^2 \cos 4\theta - 2(1-A)(D-1-A)\cos 2\theta]B^2 + [(1-A)^2 - \sin^2 \varphi(1+A+E/\sin \varphi)^2] = 0, \end{aligned} \quad (1)$$

式中: $A = P_x(t)/P_z(t)$; $B = \alpha/r$; $E = 2C \cot \varphi / P_z(t)$; $D = 2q/P_z(t)$; $P_x(t)$ 、 $P_z(t)$ 分别为 t 时刻的水平主应力和垂直主应力,分别取33.0 MPa和20.8 MPa; α 为圆巷半径(矩形巷道为其外接圆半径),扩巷前后的半径分别为2.62 m和4.46 m; r 为塑性破坏区边界的半径; C 为巷道围岩的内聚力,取1.44 MPa; φ 为巷道围岩的内摩擦角,取35°; q 为支护力,取0.2 MPa; θ 为塑性区边界任一点极坐标, $\theta \in [0, \pi]$ 。

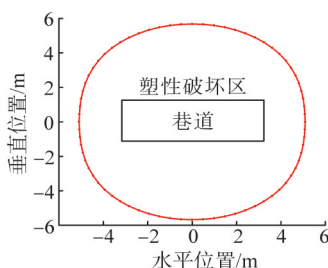
在不均匀应力场中,不同方向的塑性区存在差异,最大塑性区半径为

$$R = \alpha f(P_x, P_z, C, \varphi, \theta_{\max}), \quad (2)$$

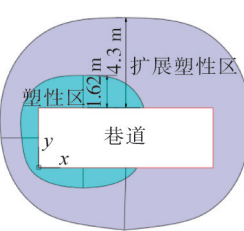
式中, $\theta_{\max}$ 为塑性区破坏半径最大处的极坐标角度。



(a) 扩巷前



(b) 扩巷后



(c) 扩巷后前后变化

图3 切眼围岩塑性区分布

Fig.3 Distribution of plastic zone in surrounding rock of the roadway

由图3可知,切眼围岩塑性区呈现椭圆形形态。扩巷前,切眼顶板破坏深度为1.62 m,两帮破坏深度约为0.45 m;当切眼宽度从4.3 m扩宽至8.4 m时,顶板破坏深度为4.30 m,两帮破坏深度为0.80 m。由图3(c)可见,切眼扩巷后对原有支护体系影响较大,因此在切眼掘进期间需综合考虑支护方案。

3 松动圈内岩体承载能力分析

为分析松动圈内岩体承载极限,建立松动圈内围岩塑性区锚杆支理论模型,见图4。

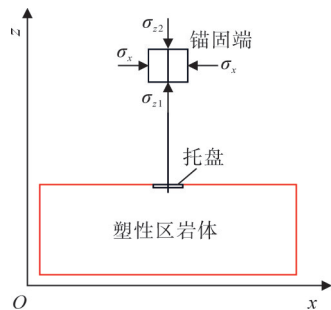


图4 塑性区锚固作用力学分析模型

Fig.4 Mechanical analysis model of anchoring action in plastic zone

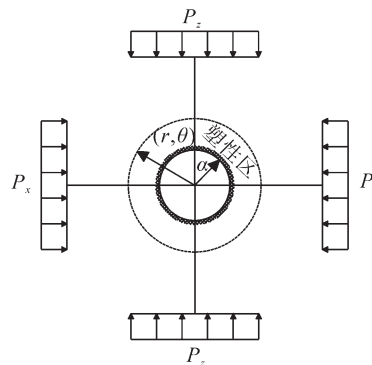


图2 塑性区计算力学模型

Fig.2 Computational mechanics model of plastic zone

将0294煤层的地应力与岩石力学参数代入式(1)、式(2),得到巷道不同位置处的塑性破坏区半径,见图3。

当锚固端长度为 l 时,设松动圈内的煤岩体间的黏结力为0,则锚固端的最大摩擦阻力为

$$F_1 = 2a_1 l \sigma_x \tan \varphi_1 + 2b_1 l \sigma_y \tan \varphi_1, \quad (3)$$

式中: σ_x 为 x 方向的水平应力; σ_y 为 y 方向的水平应力; a_1 、 b_1 为锚固端煤块的尺寸; φ_1 为岩块间摩擦角; l 为锚固端长度。

在锚固端煤块上下的合力为

$$F_2 = a_1 b_1 (\sigma_{z2} - \sigma_{z1}), \quad (4)$$

式中, σ_{z1} 和 σ_{z2} 分别为固端的上、下端垂直应力。

根据悬吊理论,锚杆所受拉力为

$$F_3 = a_2 b_2 l_1 \gamma, \quad (5)$$

式中: a_2 、 b_2 为锚杆索间排距; l_1 为悬吊岩层厚度; γ 为被悬吊顶板的容重。

因此,锚固体失稳判别准则为:当 $F_1 \geq F_2 + F_3$ 时,锚固体处于稳定状态;当 $F_1 < F_2 + F_3$ 时,锚固体处于失稳状态。

4 松动圈内岩体应力分布特征

4.1 数值模型构建

根据工程背景与地质力学条件建立数值模型,采用FLAC^{3D}软件对0294工作面切眼围岩进行模

拟。数值模型尺寸为 $100\text{ m} \times 10\text{ m} \times 60\text{ m}$, 垂直应力为 20.8 MPa , x 方向水平应力为 33.0 MPa , y 方向水平应力为 19.6 MPa 。模型上部为自由边界, 下部边界位移 w 为 0, 左右两侧位移 u 、 v 均为 0。对整个模型施加重力应力场, 各煤岩层的力学参数见表 1, 经迭代计算使模型达到初始应力平衡状态。巷道掘进分两步进行: 首先沿 9 号煤层底板掘进 $4.8\text{ m} \times 3.0\text{ m}$ 断面, 待模型稳定后再扩巷为 $8.4\text{ m} \times 3.0\text{ m}$ 断面。

4.2 模拟结果分析

根据模拟结果分析松动圈内岩体塑性区的承载能力, 对锚固体进行失稳判别。其中, 切眼围岩水平应力分布见图 5, 垂直应力分布见图 6。

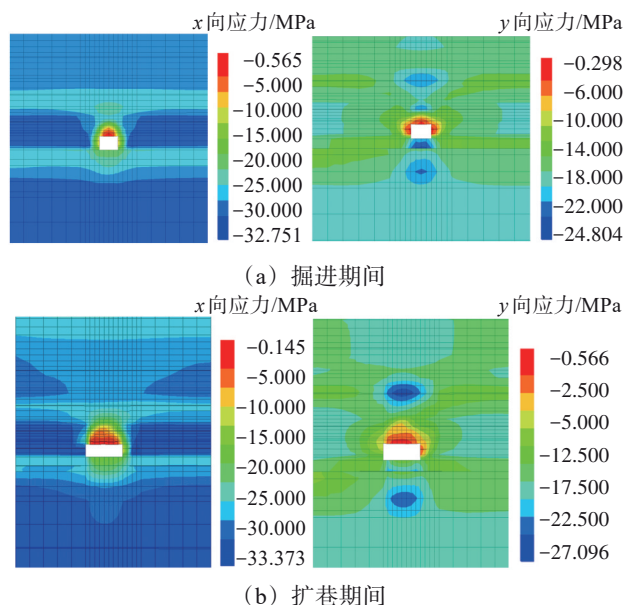


图 5 切眼围岩水平应力分布

Fig.5 Distribution of horizontal stress in surrounding rock of the roadway

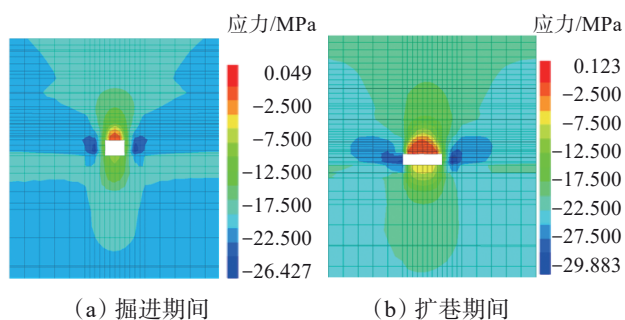


图 6 切眼围岩垂直应力分布

Fig.6 Distribution of vertical stress in surrounding rock of roadway

由图 5 和图 6 可知, 切眼围岩在掘进期间, 顶板上方 $3.0 \sim 4.5\text{ m}$ 内 x 向和 y 向应力为 $2.5 \sim 5.5\text{ MPa}$, 平均 σ_x 为 4.0 MPa 。提取该区域单元的三维应力张

量可知, σ_y 为 4.0 MPa , 此时顶板上方 3 m 处的垂直应力 σ_{z1} 为 1.0 MPa , 顶板上方 4.5 m 处的垂直应力 σ_{z2} 为 2.5 MPa ; 锚固端长度 l 为 1.5 m 。设松动圈内煤岩体间的黏结力为 0, 煤岩体内摩擦角 φ 为 31° 。由于锚固端处煤块尺寸难以确定, 此处设 a_1 、 b_1 均为 0.1 m 。将上述数据代入式 (3)、式 (4), 可得 $F_1=1\,442.1\text{ kN}$ 、 $F_2=15.0\text{ kN}$ 。

当短锚索间排距为 $1.6\text{ m} \times 0.8\text{ m}$ 、短锚索承载最大值为 4.5 m 煤层、 γ 为 14.6 kN/m^3 时, 代入式 (5) 可得 $F_3=84.1\text{ kN}$ 。

由于 $F_1 \geq F_2 + F_3$, 判定锚固体处于稳定状态, 具有较大水平应力, 上覆岩层塑性区仍具有较高的承载能力, 可满足支护要求。此外, 短锚索承载能力受岩体尺寸影响, 当巷道上方的水平应力为 4.0 MPa 、垂直应力分别为 2.5 MPa 和 1.0 MPa 时, 短锚索承载能力与岩块尺寸关系见图 7。

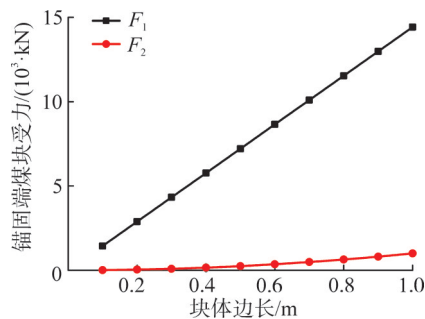


图 7 不同尺寸块体的短锚索承载能力

Fig.7 Bearing capacity of short anchor cables for blocks of different sizes

由图 7 可知, 随着岩块体边长的增加, F_1 呈线性增长趋势, F_2 增长较为缓慢, 但增速不断上升。这说明锚固端岩体的承载能力与岩体的破碎程度有关, 块体边长越大, 其承载能力越大。对于锚杆而言, 锚固端范围为顶板上方的 $1.8 \sim 2.4\text{ m}$, 该范围内的水平应力为 1.0 MPa 左右, 顶板上方 1.8 m 处的垂直应力 σ_{z1} 为 0.6 MPa , 顶板上方 2.4 m 处的垂直应力 σ_{z2} 为 0.8 MPa , 将数据代入式 (3) 和式 (4) 可得 $F_1=360.5\text{ kN}$ 、 $F_2=2.0\text{ kN}$ 。当锚杆间排距为 $1.6\text{ m} \times 0.8\text{ m}$, 短锚索承载最大范围为 2.4 m 煤层时, 则 $F_3=44.9\text{ kN}$ 。因此, 锚固体处于稳定状态, 可满足支护要求。

不同尺寸块体的锚杆承载能力见图 8, 随着岩块边长的增加, F_1 与 F_2 呈现出与短锚索相似的趋势, 且锚杆的承载能力明显弱于短锚索。但由于顶板上方浅层的承载力要求相对较低, 此处采用锚杆支护, 可在保证承载能力的同时进一步降低支护成本。

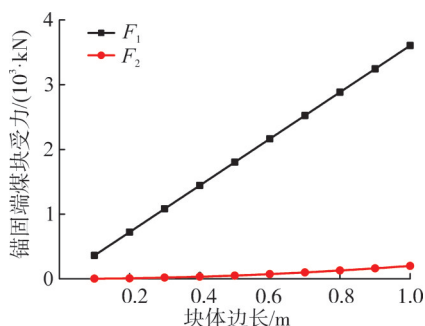


图8 不同尺寸块体的锚杆承载能力

Fig.8 Bearing capacity of anchor rods for blocks of different sizes

5 联合支护参数设计

由理论计算可知,掘进4.3 m宽的切眼时,巷道顶板破坏深度为1.62 m,两帮破坏深度为0.45 m;切眼扩巷后,顶板破坏深度增至4.30 m,两帮破坏深度为0.80 m,顶板破坏深度已超出锚杆有效控制范围。巷道支护设计的目标是通过锚杆(索)将围岩从被动承载体转变为主动承载结构,借助多层次、协同作用的支护单元,实现对巷道围岩的内部加固与浅表约束。具体而言:采用2.4 m锚杆实现浅层加固与悬吊,主要控制巷道周边浅部的

破坏区;采用10.5 m长锚索实现深部锚固与控层,将关键顶板岩层锚固于深部稳固的主岩层中,防止顶板发生层间分离;采用6.5 m注浆锚索实现过渡区补强,主要控制深部塑性区内的应力传递与变形,抑制破坏范围向围岩深部扩展。锚杆与锚索的支护力通过高刚度的托盘、“W”形钢带、“U”形钢梁,及钢筋网等浅表约束元件传递至围岩表面,形成一个整体化的护表系统^[21-22]。

结合现场煤岩体数据,对锚杆、短锚索及长锚索的参数进行优化设计,主要参数见表2。考虑到扩巷前后巷道围岩塑性区差异较大,因此在掘进4.3 m×3.0 m切眼时,支护参数按扩巷后的参数设计,短锚索与锚杆间隔布置,以确保扩巷后切眼的支护安全与稳定。

根据表2设计扩巷前后锚杆索联合支护方案,见图9和图10。

表2 锚杆索联合支护参数

Tab.2 Parameters of bolt-cable combined support			
支护方式	杆体长度/m	支护位置	间排距/(m×m)
锚杆支护	2.4	顶板	1.6×0.8
锚杆支护	2.4	帮部	0.8×0.8
注浆锚索	6.5	顶板	1.6×0.8
长锚索	10.5	顶板	1.6×0.8

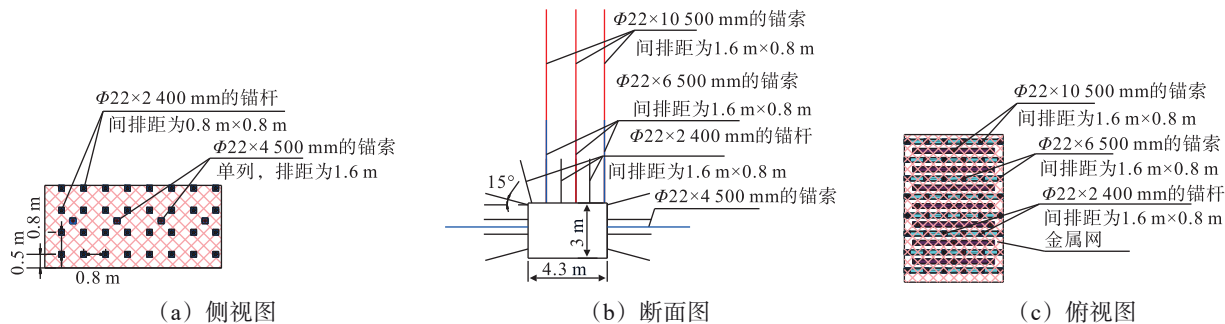


图9 扩巷前巷道支护设计

Fig.9 Roadway support design before roadway expansion

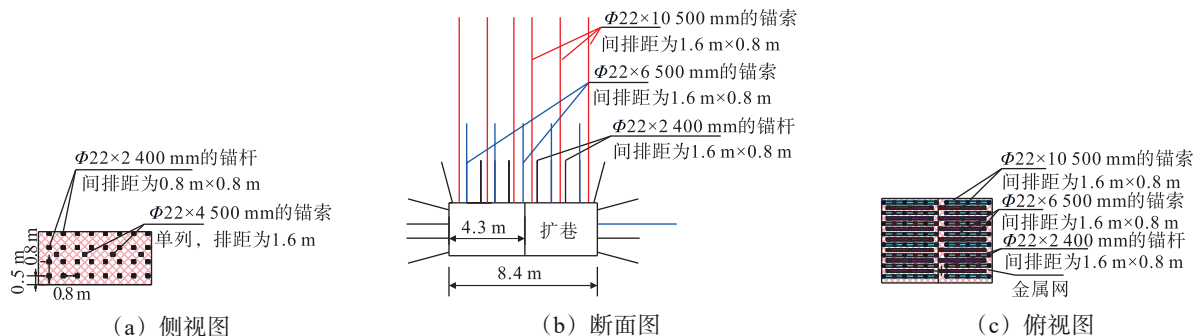


图10 扩巷后巷道支护设计

Fig.10 Roadway support design after roadway expansion

为验证该联合支护方案在高应力下的现场应用效果,对0294巷道开展长期现场围岩变形监测。

现场实测结果表明:顶底板的变形量约为200 mm,帮部的位移量约为100 mm。巷道变形特征主要表

现为顶板切顶式下沉、帮部整体变形两类典型破坏形态,见图 11。从变形量来看,顶板和两帮的位移量均小于临界值,表明巷道围岩在经历扩巷

的强扰动后实现了长期协同稳定,该方案在 0294 巷道取得了较好的支护效果。



(a) 顶板切顶式下沉



(b) 帮部整体变形

图 11 巷道围岩变形特征分析

Fig.11 Analysis of deformation characteristics of roadway surrounding rock

6 结论

(1) 0294 工作面切眼围岩塑性区整体呈现椭圆形形态,在掘进期间的顶板破坏深度为 1.62 m,两帮为 0.45 m;扩巷后顶板最大破坏深度剧增至 4.30 m,两帮为 0.80 m,松动圈范围超出常规锚杆的有效控制深度。

(2) 开挖后顶板浅部岩体在平均 4.0 MPa 的水平应力作用下,松动圈内破碎煤岩体仍具备较高的承载能力,满足悬吊支护要求;锚杆与锚索的锚固力随锚固端岩块体边长增大而增大。

(3) 确定“2.4 m 锚杆+6.5 m 注浆锚索+10.5 m 长锚索”的非对称多层次联合支护参数,实现浅层悬吊、过渡区补强与深部完整岩层的协同稳定控制。实测结果表明,顶底板变形量小于 200 mm,帮部位移量小于 100 mm,表明多层次支护技术能够满足大塑性区巷道支护要求。

参考文献(References):

- [1] 康红普,姜鹏飞,王子越,等.煤巷钻锚一体化快速掘进技术与装备应用[J].煤炭学报,2024,49(1): 131-151.
Kang Hongpu, Jiang Pengfei, Wang Ziyue, et al. Coal roadway rapid driving technology and equipment with integrated drilling and anchoring and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 131-151.
- [2] 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.
- [3] He M C. Latest progress of soft rock mechanics and engineering in China[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2014, 6(3): 165-179.

- [4] 康红普,姜鹏飞,刘畅.煤巷智能快速掘进技术与装备的发展方向[J].采矿与岩层控制工程学报,2023,5(2):5-7.

Kang Hongpu, Jiang Pengfei, Liu Chang. Development of intelligent rapid excavation technology and equipment for coal mine roadways[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2023, 5(2): 5-7.

- [5] Kang H P, Gao F Q, Xu G, et al. Mechanical behaviors of coal measures and ground control technologies for China's deep coal mines-A review[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2023, 15(1): 37-65.

- [6] 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.

- [7] 黄炳香,张农,靖洪文,等.深井采动巷道围岩流变和结构失稳大变形理论[J].煤炭学报,2020,45(3): 911-926.

Huang Bingxiang, Zhang Nong, Jing Hongwen, et al. Large deformation theory of rheology and structural instability of the surrounding rock in deep mining roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(3): 911-926.

- [8] 马念杰,郭晓菲,赵志强,等.均质圆形巷道蝶型冲击地压发生机理及其判定准则[J].煤炭学报,2016,41(11): 2679-2688.

Ma Nianjie, Guo Xiaofei, Zhao Zhiqiang, et al. Occurrence mechanisms and judging criterion on circular tunnel butterfly rock burst in homogeneous medium[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(11): 2679-2688.

- [9] Liang X T, Ding C X, Zhu X G, et al. Visualization study on stress evolution and crack propagation of jointed rock mass under blasting load[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2024, 296: 109833.

- [10] 李季,强旭博,马念杰,等.巷道围岩蝶形塑性区蝶叶方向性形成机制及工程应用[J].煤炭学报,2021,46(9): 2838-2852.

- Li Ji, Qiang Xubo, Ma Nianjie, et al. Formation mechanism and engineering application of the directionality of butterfly leaf in the butterfly plastic zone of roadway rock surrounded[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(9): 2838-2852.
- [11] 李季, 马念杰, 丁自伟. 基于主应力方向改变的深部沿空巷道非均匀大变形机理及稳定性控制[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(4): 670-676.
- Li Ji, Ma Nianjie, Ding Ziwei. Heterogeneous large deformation mechanism based on change of principal stress direction in deep gob side entry and control[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2018, 35(4): 670-676.
- [12] 王卫军, 董恩远, 袁超. 非等压圆形巷道围岩塑性区边界方程及应用[J]. 煤炭学报, 2019, 44(1): 105-114.
- Wang Weijun, Dong Enyuan, Yuan Chao. Boundary equation of plastic zone of circular roadway in non-axisymmetric stress and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(1): 105-114.
- [13] 靖洪文, 尹乾, 朱栋, 等. 深部巷道围岩锚固结构失稳破坏全过程试验研究[J]. 煤炭学报, 2020, 45(3): 889-901.
- Jing Hongwen, Yin Qian, Zhu Dong, et al. Experimental study on the whole process of instability and failure of anchorage structure in surrounding rock of deep-buried roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(3): 889-901.
- [14] 靖洪文, 吴疆宇, 孟波, 等. 深部矩形底煤巷围岩破坏失稳全过程宏观演化特征研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(1): 82-93.
- Jing Hongwen, Wu Jiangyu, Meng Bo, et al. Macroscopic and mesoscopic evolution characteristics of surrounding rock of rectangular bottom coal roadway in deep during failure[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2022, 39(1): 82-93.
- [15] 李建忠, 高富强, 娄金福, 等. 破碎岩体锚固及承载失稳机制研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(6): 1125-1134.
- Li Jianzhong, Gao Fuqiang, Lou Jinfu, et al. Study on reinforcement and bearing-instability mechanism of broken rock mass[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2022, 39(6): 1125-1134.
- [16] 马念杰, 马海燕, 王银伟, 等. 深部大变形巷道支护原理与柔性锚索支护技术[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(5): 957-964.
- Ma Nianjie, Ma Haiyan, Wang Yinwei, et al. Support principle and flexible cable support technology of deep large deformation roadway[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(5): 957-964.
- [17] He M C, Wang Q. Excavation compensation method and key technology for surrounding rock control[J]. Engineering Geology, 2022, 307: 106784.
- [18] 白璐, 詹小凡, 邵良杉. 孤岛工作面强烈动压巷道变形控制[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2020, 39(2): 107-112.
- Bai Lu, Zhan Xiaofan, Shao Liangshan. Deformation control of strong dynamic pressure roadway in island working face[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2020, 39(2): 107-112.
- [19] 王书刚, 熊怀鑫, 孙利辉, 等. 深部动压巷道卸-固协同控制技术研究[J]. 煤炭工程, 2025, 57(6): 57-66.
- Wang Shugang, Xiong Huaixin, Sun Lihui, et al. Collaborative pressure-releasing and reinforcement control technology for deep dynamic pressure roadway[J]. Coal Engineering, 2025, 57(6): 57-66.
- [20] 郭晓菲, 马念杰, 赵希栋, 等. 圆形巷道围岩塑性区的一般形态及其判定准则[J]. 煤炭学报, 2016, 41(8): 1871-1877.
- Guo Xiaofei, Ma Nianjie, Zhao Xidong, et al. General shapes and criterion for surrounding rock mass plastic zone of round roadway [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(8): 1871-1877.
- [21] Li C C. A new energy-absorbing bolt for rock support in high stress rock masses[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2010, 47(3): 396-404.
- [22] Li D Q, Cai M, Masoumi H. A constitutive model for modified cable bolts exhibiting cone shaped failure mode[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 145: 104855.