

doi: 10.16104/j.issn.1673-1891.2026.01.006

深部软岩巷道破坏机理分析及返修控制

孙自强, 舒 灏, 魏 捷

(合肥城市学院土木工程学院, 安徽 合肥 230071)

摘要:为解决深部软岩巷道围岩大变形显著, 支护体系失效频发等难题, 以安徽某矿 12 采区行人下山巷道围岩控制实例为研究对象, 分析了深部软岩巷道破坏机理, 针对性提出了巷道围岩返修控制方案, 并在工程中得到成功应用。结果表明: (1) 巷道围岩岩性软弱、强度低、大埋深、高地应力、原有支护参数设计不合理等因素是造成巷道变形破坏的主因。(2) 采用返修控制方案后, 巷道围岩塑性区扩展和各部位变形量得到有效抑制, 顶板、帮部和底板塑性区范围分别为 1.8、1.6 和 2.7 m, 各部位变形量分别为 105、245 和 133 mm, 较原支护方案降低程度均超出 76.3%。(3) 现场工程应用显示, 巷道围岩各部位变形量较小, 变形量呈现“两帮移进量>顶板下沉量>底臃量”的变形特征, 最大两帮移进量仅为 222 mm, 围岩控制效果显著, 该方案可为类似巷道支护设计及参数优化提供一定参考。

关键词:深部软岩巷道; 破坏机理; 返修支护设计; 围岩控制

中图分类号: TD353 文献标志码: A 文章编号: 1673-1891(2026)01-0048-07

Analysis of the Failure Mechanism of Deep Soft Rock Roadways and Research on Rework Control

SUN Ziqiang, SHU Hao, WEI Jie

(School of Civil Engineering, City University of Hefei, Hefei 230071, Anhui, China)

Abstract: To solve the problems of significant large deformation of surrounding rock and frequent failure of support systems in deep soft rock roadways, this study takes the surrounding rock control of the pedestrian downhill roadway in the 12th mining area of a coal mine in Anhui Province as the engineering background, analyzes the failure mechanism of deep soft rock roadways, and proposes a targeted rework control scheme for roadway surrounding rock, which has been successfully applied in engineering practice. The results show that: (1) The main causes of roadway deformation and failure include weak lithology and low strength of surrounding rock, large burial depth, high in-situ stress, and unreasonable design of the original support parameters. (2) After the application of the rework control scheme, the expansion of the plastic zone and the deformation of each part of the roadway surrounding rock are effectively suppressed. The plastic zone ranges of the roof, two sides and floor are 1.8, 1.6 and 2.7 m, respectively, and the corresponding deformations are 105, 245 and 133 mm, respectively. The reduction degrees of all deformation indicators compared with the original support scheme exceed 76.3%. (3) Field engineering application results show that the deformation of each part of the roadway surrounding rock is relatively small, presenting the characteristic of "deformation of two sides > roof subsidence >

收稿日期: 2025-10-28

基金项目: 2023 年安徽省高等学校科学研究项目(2023AH053241); 2024 年安徽省质量工程项目(2024xsxx127); 合肥城市学院校级课程教学改革研究项目(2023jyxm003)。

第一作者简介: 孙自强(1987—), 男, 安徽淮南人, 讲师, 硕士, 主要研究方向为地下结构计算与理论研究。E-mail: 822543182@qq.com。

floor heave". The maximum deformation of the two sides is only 222 mm, and the surrounding rock control effect is remarkable. The research results can provide a reference for the support design and parameter optimization of similar roadways.

Keywords: deep soft rock roadway; failure mechanism; rework support design; surrounding rock control

0 引言

近年来,随着浅部煤炭资源日渐枯竭,深部开采成为新常态^[1-3]。煤炭开采进入800~1500 m深部开采水平时,巷道围岩稳定控制极具挑战性,特别是在深部软岩开采工程背景下,受“三高一扰动”影响,巷道矿压显现强烈、围岩大变形显著、支护构件大量失效,致使冒顶、片帮动力灾害频发,涌现出大量松散破碎难支护巷道,巷道返修次数和强度大大增加^[4-5]。因此,开展深部软岩巷道破坏机理分析和支护参数设计优化意义重大,众多专家学者对此开展了深入研究。

王想君等^[6]建立了考虑围岩峰值应力影响的巷道破坏分区力学模型,指出各分区边界的渐进式扩展是导致软岩巷道破坏严重、支护构件频繁失效的主要原因。赵光明等^[7]通过理论推导,建立了考虑围岩应力与支护阻力作用下巷道围岩弹性区、塑性区半径及应力的计算模型,并探讨了锚固承载拱效应的有无对结果的影响,为高应力软岩巷道的支护形式与参数设计奠定了理论基础。孙利辉^[8]基于弱胶结地层冒落体的变形破坏特征,揭示了此类冒落体变形破坏的演化机理。孟庆彬等^[9]对泥质弱胶结软岩巷道的破坏机理进行了深入分析,指出围岩遇水泥化崩解、胶结性差及强度低等因素是此类巷道变形破坏的主控因素。针对侏罗白垩纪极弱胶结软岩巷道破坏严重的现象,乔卫国等^[10]揭示其关键影响因素包括围岩富含膨胀性矿物、软化系数高、强度低以及支护设计不合理,并阐明了此类巷道的变形破坏演化规律。巷道控制技术方面,目前初次支护在维护深部巷道稳定方面面临诸多挑战,大多巷道须经多次返修才能有效控制围岩变形。陈顺

满等^[11]系统总结了软岩巷道变形破坏特征及其影响因素,据此提出了“壁后注浆+锚喷支护”的修复控制方案。郭志飏等^[12]通过对比分析常规支护与补偿支护的围岩控制效果,提出了恒阻高预应力锚索控制技术,并在工程实践中成功应用。针对厚煤层巷道严重变形破坏问题,陈梁等^[13]采用锚杆-金属网-锚索-注浆阶梯式支护技术,显著改善了采动巷道的治理效果。为解决泉店煤矿某巷道频繁修复的难题,吴锋锋等^[14]提出了变径分区卸压技术,有效控制了巷道围岩变形。王方田等^[15]提出的“围岩加固-卸压-高强支护”综合控制策略,有效保障了深井松软围岩的稳定性控制需求。针对托顶煤巷道冲击灾害频发的问题,曹安业等^[16]提出了相应的抗冲击支护优化设计方案,较好地解决了冲击动载作用下的顶板控制难题。崔建军^[17]提出了以“强帮支护”为核心的联合控制技术,现场试验证实该方案可显著提升阳泉矿区某煤层沿空掘巷的围岩控制效果。何杰等^[18]深入分析了坚硬顶板巷道围岩应力场的演化规律,进而提出了“预制墙+高强支护+切顶卸压”的综合控制方案,成功实现了坚硬顶板围岩的稳定控制。上述研究者对巷道变形破坏机理进行了深入研究,并在巷道控制技术方面取得了丰富成果。但是不同工程地质条件下软岩巷道围岩破坏机理差别很大^[19-20],支护对策针对性明显不同。因此,亟须根据不同地质条件下巷道具体变形破坏特征进行相应支护设计,以期取得较好的治理效果。

本文在前人研究的基础上,以安徽某矿12采区行人下山巷道为工程背景,基于巷道破坏特征和变形破坏机理,提出合理的支护措施,旨在为类似条件巷道支护设计及参数优化提供一定参考。

1 工程背景

1.1 工程概况

行人下山巷道位于安徽某煤矿 12 采区,平均埋深约 850 m,全长近 525 m,为行人和货物运输通道。该巷道地应力测试结果显示最大水平主应力为 22.67 MPa,与巷道走向近似呈 60° 夹角趋势,垂直应力为 18.34~20.37 MPa。巷道位于煤层、泥砂互层和粉细砂岩之间,顶底板岩性软弱且泥性显著、遇水易崩解、胶结性差,围岩节理裂隙发育、强度低、承载能力差。

该巷道断面形状为直墙半圆形(净高×净宽为 5 100 mm×5 400 mm),原支护方案采用“锚网索喷”支护形式,其中锚杆:Φ22 mm×L2 500 mm 的左旋无纵肋螺纹钢锚杆,预紧力为 100 kN,锚固长度为 1.78 m,间排距为 800 mm×800 mm;顶板和帮部锚索:Φ21.8×L6 200 mm 高强度钢绞线,预紧力为 200 kN,锚固长度为 2.56 m,间排距为 1 600 mm×1 600 mm;拱架采用 U36 型钢,排距 800 mm。锚网采用 Φ 6.5 mm@100×100 mm,规格为 1 200 mm×2 000 mm 的钢筋网;巷道表面喷射 C20 混凝土,厚度为 100 mm,具体如图 1 所示。

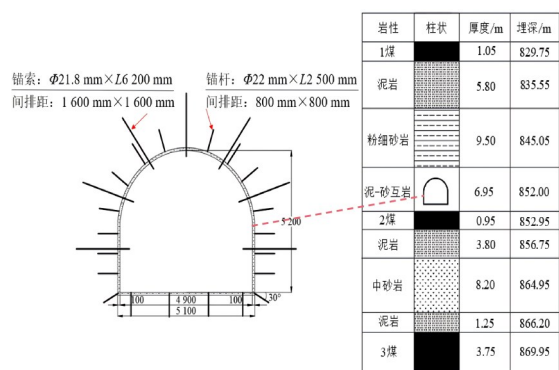


图 1 原支护方案及岩层

1.2 原支护方案下现场变形破坏

原支护设计手段无法满足巷道正常使用需求,巷道变形破坏非常严重,如图 2 所示。

结合图 2 和现场观测,巷道变形破坏主要有以

下特征。

1) 巷道整体断面收敛剧烈且破碎严重,围岩承载能力极差,矸石、喷层大块掉落,现场揭露巷道所处层位为煤系地层(图 2(a))。

2) 喷层大面积开裂现象严重,破坏范围大,喷层大块掉落时有发生(图 2(b))。

3) 支护构件失效频发,锚索剪断(散开)、锚杆断裂、托盘脱离岩面、扭曲变形等现象明显(图 2(c))。

4) 底臃现象严重,底板剧烈鼓出,轨道破坏程度深,钢轨出现突起变形等现象(图 2(d))。

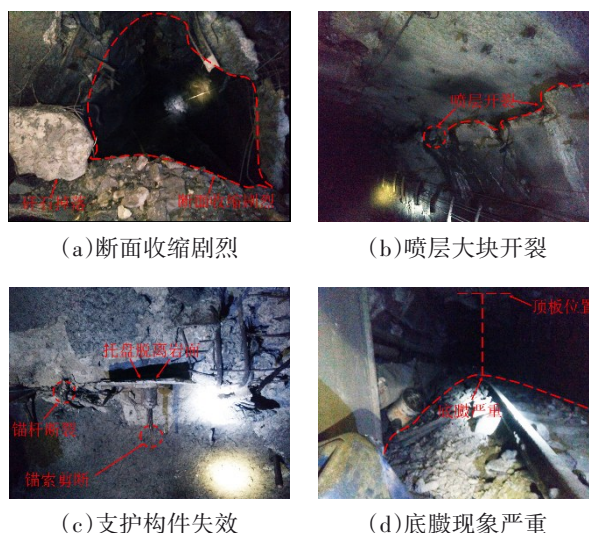


图 2 原支护方案下巷道变形破坏情况

1.3 直墙拱形巷道围岩松动状态测试

明确围岩松动区域分布形态和范围,对其支护形式和参数的设计有重要指导意义。选取行人下山巷道典型破坏断面,进行围岩破碎范围探测。由于该巷道破坏程度高,钻孔成型维持时间短容易堵孔,从而影响后续窥视。因此,当窥视孔完成后,立即对孔内冲水排渣,并随即进行围岩松动圈探测。根据提取的钻孔窥视图像,结合现场破坏特征,获取围岩松动圈分布特征及范围,如图 3 所示。图 3 中黑色区域代表钻孔内壁观测到的破碎区域,充填区域则表征围岩松动圈的范围。

钻孔窥视结果表明,巷道浅部围岩形成松动破

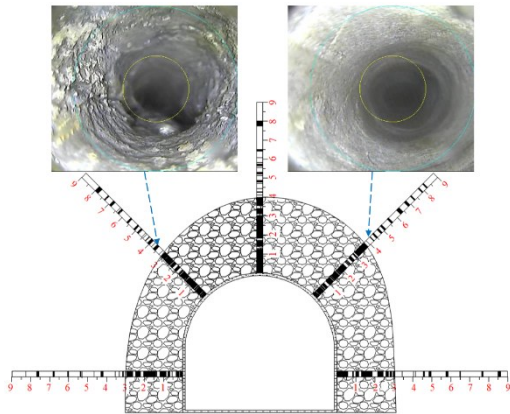


图3 巷道破坏范围探测

坏区, 松动圈范围约为 3.0~4.1 m, 为大松动破碎圈不稳定围岩。该区域内围岩破碎范围大、程度深, 内部裂隙发育密集, 以张开裂隙为主。其中顶板破坏范围最大, 呈现“顶板>右拱肩>左拱肩>右帮>左帮”的变形特征, 这主要是因为顶板含 2 种以上软弱岩层, 交界面力学性能弱, 整体岩性较差。在原支护控制措施下, 巷道产生超出锚杆自身长度的松动破碎圈, 锚杆锚固端落入松动破碎区, 无法形成有效锚固力, 支护效能难以发挥, 极不利于巷道顶板围岩稳定控制。

1.4 巷道破坏影响因素分析

结合现场巷道围岩破坏特征, 分析了造成行人下山巷道破坏的主要因素如下。

1) 巷道赋存于泥质岩与砂岩互层段, 顶底板岩性主要包括粉细砂岩、泥砂互层及煤层。围岩整体强度低, 泥质含量高, 节理与裂隙发育, 导致其自稳与承载能力显著不足。

2) 巷道埋深较大, 处于高地应力环境。高地应力作用加速了深部软岩的强度劣化与变形累积, 致使巷道围岩出现显著变形与破坏。

3) 原支护参数设计存在不足, 尤其未能对底板进行有效支护。巷道底板夹有厚度约 0.95 m 的煤层, 距钢轨路面约 1.2 m, 形成力学薄弱层。在软弱岩性、高地应力等复杂因素耦合作用下, 底板失稳进一步加剧了巷道整体变形与破坏。

2 深部软岩巷道破坏机理分析

当最大水平主应力 σ_H 与巷道走向夹角为 $\alpha=60^\circ$ 时, 原岩应力场在巷道横截面(垂直于走向的平面)上的投影呈现双向水平应力叠加特征, 围岩应力重分布情况更复杂, 力学分析如图 4 所示。

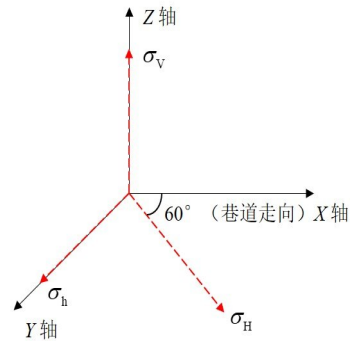


图4 力学分析

通过应力旋转公式推导巷道围岩应力分量, 将原岩应力 ($\sigma_H, \sigma_h, \sigma_v$) 从全局坐标系 (X, Y, Z) 转换到巷道坐标系, 得到在巷道横向 (Y 方向) 和纵向 (X 方向) 上的水平应力分量及剪应力, 如式 (1) 所示。

$$\begin{cases} \sigma_y = \sigma_H \sin^2 \alpha + \sigma_h \cos^2 \alpha \\ \sigma_x = \sigma_H \cos^2 \alpha + \sigma_h \sin^2 \alpha \\ \tau_{xy} = (\sigma_H - \sigma_h) \sin \alpha \cos \alpha \end{cases} \quad (1)$$

代入 $\alpha=60^\circ$, 可得到式 (2)。

$$\begin{cases} \sigma_y = \frac{3\sigma_H + \sigma_h}{4} \\ \sigma_x = \frac{\sigma_H + 3\sigma_h}{4} \\ \tau_{xy} = \frac{\sqrt{3}(\sigma_H - \sigma_h)}{4} \end{cases} \quad (2)$$

对于直墙半圆拱巷道(可等效为椭圆孔问题), 在斜交应力场作用下的围岩应力分布, 需采用复变函数法进行求解, 将双向水平应力 (σ_x, σ_y) 和剪应力 (τ_{xy}) 作为远场边界条件, 代入椭圆孔应力解的通式 (3)。

$$\sigma_\theta = A + B \cos 2\theta + C \sin 2\theta \quad (3)$$

式中: 系数 A, B, C 与 $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ 相关, 代入 $\alpha=60^\circ$ 时求得的巷道坐标系应力分量, 经过化简, 可得到巷道两帮(位置为 $y=\pm R$, 对应于极角 $\theta=90^\circ$ 或 $\theta=270^\circ$) 中

点的切向应力表达式,如式(4)所示。

$$\sigma_{\theta} = 3\sigma_y - \sigma_v + 2\tau_{xy} \sin 2\theta \quad (4)$$

代入 $\theta=90^\circ$ 或 $2\theta=70^\circ$,可得到式(5)。

$$\sigma_{\theta} = \frac{9\sigma_H - \sigma_h}{4} \quad (5)$$

由此可知,在 $\alpha=60^\circ$ 的斜交应力场下,作用在巷道两帮的切向应力构成更为复杂,其大小与最大、最小水平主应力均有关联,加剧了两帮鼓出和底臃,需采取全断面高强支护体系控制围岩稳定。

3 巷道返修控制对策及方案

3.1 巷道返修控制对策分析

根据行人下山巷道围岩破坏特征和机理分析,针对性提出巷道返修控制技术。

针对该巷道支护需求,提出2点控制理念:一是通过注浆增强围岩自承能力,二是强化支护体系抑制围岩变形。故采取“全断面预应力注浆锚索+全断面注浆锚杆+全断面钢拱架+反底拱+壁厚充填”高强联合控制对策,如图5所示。

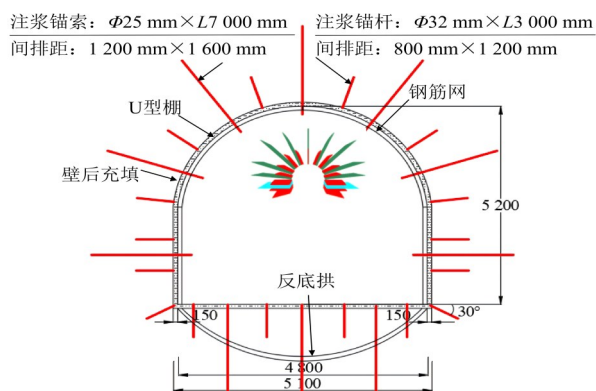


图5 返修支护设计断面

结合团队多年研究成果^[5,21-23],依据巷道破坏程度和现场监测数据,设计主要支护参数如下。

1) 钢拱架参数:采用U36型钢拱架,排距800 mm。

2) 注浆锚索参数:巷道全断面采用型号为 $\Phi 22 \text{ mm} \times L7 \text{ 000 mm}$ 的预应力注浆锚索,间排距 $1 \text{ 200 mm} \times 1 \text{ 600 mm}$,每排布设10根,水灰比为0.5:1。

3) 注浆锚杆参数:巷道全断面采用型号为 $\Phi 32 \text{ mm} \times L3 \text{ 000 mm}$ 的中空注浆锚杆,间排距 $800 \text{ mm} \times 1 \text{ 200 mm}$,每排布设21根,水灰比为0.5:1。

3) 反底拱参数:巷道底板卧成反底拱结构,充填C30混凝土。

4) 钢筋网参数:采用 $\Phi 6.5 \text{ mm}$ 圆钢焊接的单层钢筋网,网片尺寸为 $1 \text{ 250 mm} \times 500 \text{ mm}$,网孔尺寸为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$,搭接长度为100 mm。

5) 壁厚充填参数:充填C20混凝土,厚度为150 mm,水泥、砂和石子质量配比为1:2:2,水灰质量配比为1:2。

3.2 支护优化设计效果分析

3.2.1 数值计算结果分析

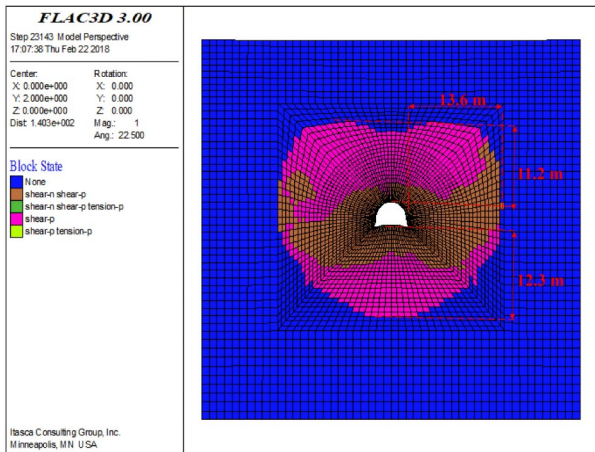
为验证巷道返修控制技术的合理性,分别对原支护方案和返修控制方案进行数值模拟计算,巷道围岩塑性区及围岩各部位变形量如图6~7所示。

1) 塑性区对比。

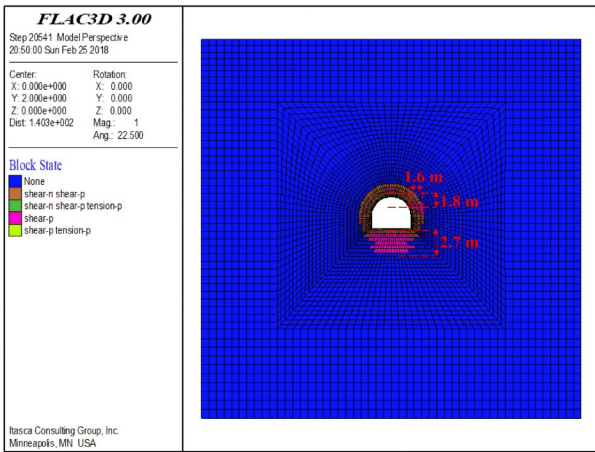
由图6可知,采用原支护方案时,巷道围岩整体塑性区扩展范围较大,顶板、帮部和底板塑性区范围分别为11.2、13.6、12.3 m,说明巷道破坏严重,其中巷道帮部受最大水平主应力影响,帮部破坏范围最大。而采取返修控制方案后,巷道围岩塑性区扩展得到有效抑制,顶板、帮部和底板塑性区范围分别为1.6、1.8、2.7 m,降低程度分别为85.7%、86.8%、78.0%,巷道塑性区扩展范围较为均匀,表明巷道返修方案具有较强的可靠性,可以推广实施此方案。

2) 围岩变形量对比。

由图7可知,采用原支护方案时,巷道围岩各部位变形量较大,其中顶板下沉量为543 mm,两帮移进量为1 032 mm,底臃量为689 mm。巷道实施针对性返修控制方案后,巷道围岩变形量显著降低,各部位变形量分别为105、245、133 mm,较原支护方案分别降低了80.7%、76.3%、80.7%,巷道控制效果显著,进一步验证了此返修控制技术的合理性。



(a)原支护方案



(b)返修方案

图 6 原支护方案和返修方案下塑性区对比

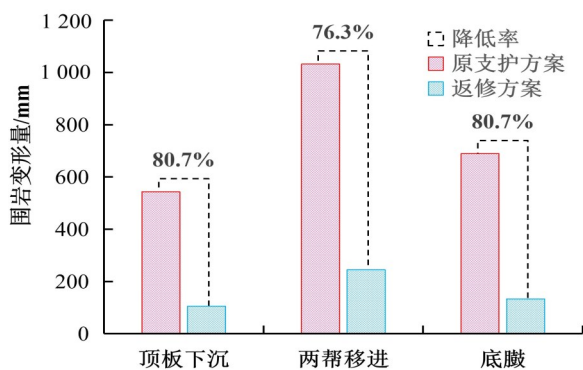


图 7 原支护方案和返修方案下围岩变形量对比

3.2.2 现场监测结果分析

为了验证数值模拟计算结果的合理性,现场开展围岩变形监测。图 8 为 60 d 后巷道围岩变形数据曲线图。

由图 8 可知,巷道返修方案实施 60 d 后,巷道围

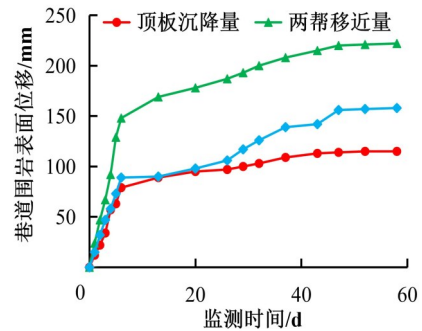


图 8 巷道围岩位移现场监测

岩各部位变形量较小,变形量呈现“两帮移进量>顶板下沉量>底臃量”的变形特征,两帮移进量最大值为 222 mm,顶板下沉和底臃位移均不超过 150 mm,这是由于深部巷道地应力以水平构造应力为主导,形成对巷道两帮的强烈侧向挤压,致使两帮移进量较大,而采用“全断面预应力注浆锚索+全断面注浆锚杆+全断面钢拱架+反底拱+壁厚充填”高强联合控制对策后,充分发挥岩体自承能力与支护协同作用,围岩变形得到有效抑制。现场实测和数值计算结果较吻合,再次验证该返修控制方案的合理性。

4 结论

1) 安徽某煤矿 12 采区行人下山巷道在原支护方案下围岩大变形显著,底臃现象严重,喷层大块开裂、掉落,支护体系失效。对巷道围岩进行破碎范围探测,显示松动圈范围约为 3.0~4.1 m,均超出锚杆锚固深度,致使锚杆没有稳定的锚固基础,支护潜力难以有效发挥,巷道围岩稳定难以控制。

2) 基于行人下山巷道破坏特征和机理分析可得,巷道围岩难以控制的主因是岩性软弱、强度低,大埋深、高地应力,原有支护体系设计不合理。

3) 数值计算和现场监测表明,“全断面预应力注浆锚索+全断面注浆锚杆+全断面钢拱架+反底拱+壁厚充填”高强联合控制方案控制围岩效果显著,巷道围岩变形量较小,变形量呈现“两帮移进量>顶板下沉量>底臃量”的变形特征,两帮移进量最大值为 222 mm,顶板下沉和底臃位移不超过 150 mm。因此,可在类似巷道支护设计中推行此方案。

参考文献:

- [1] 程桦,蔡海兵,荣传新,等.深立井连接硐室群围岩稳定性分析及支护对策[J].煤炭学报,2011,36(2):261-266.
- [2] SUN X M, CHEN F, HE M C, et al. Physical modeling of floor heave for the deep-buried roadway excavated in ten degree inclined strata using infrared thermal imaging technology[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 63: 228-243.
- [3] LI Y L, YANG R S, FANG S Z, et al. Failure analysis and control measures of deep roadway with composite roof: a case study [J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2022, 9(1): 1-18.
- [4] WANG Q, HE M C, YANG J, et al. Study of a no-pillar mining technique with automatically formed gob-side entry retaining for longwall mining in coal mines [J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2018, 110: 1-8.
- [5] 孙茂如,程桦,潘锐,等.深部巷道注浆锚索锚注分析及返修控制研究[J].采矿与安全工程学报,2024,41(5):982-989.
- [6] 王想君,李英明,赵光明,等.深井软弱围岩联合控制技术及其耦合叠加拱承载效应研究[J].中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(6): 2496-2512.
- [7] 赵光明,刘崇岩,孟祥瑞,等.高应力巷道锚固复合承载体及其承载效应研究[J].采矿与安全工程学报,2021,38(1): 68-75.
- [8] 孙利辉.西部弱胶结地层大采高工作面覆岩结构演化与矿压活动规律研究[D].北京:北京科技大学,2017.
- [9] 孟庆彬,韩立军,乔卫国,等.泥质弱胶结软岩巷道变形破坏特征与机理分析[J].采矿与安全工程学报,2016,33(6): 1014-1022.
- [10] 乔卫国,韦九洲,林登阁,等.侏罗白垩纪极弱胶结软岩巷道变形破坏机理分析[J].山东科技大学学报(自然科学版), 2013, 32(4): 1-6.
- [11] 陈顺满,吴爱祥,王少勇,等.软弱围岩巷道变形机理及返修控制技术[J].中国矿业大学学报,2018,47(4):830-837.
- [12] 郭志飏,李伟涛,何满潮,等.基于补偿理论的深部软岩动压巷道破坏机理及控制对策[J].中国矿业大学学报,2023,52(5):931-942.
- [13] 陈梁,孟庆彬,戚振豪,等.深部厚煤层采动巷道失稳特征及锚网索注梯级支护技术[J].采矿与安全工程学报,2024,41(3):533-548.
- [14] 吴锋锋,谷浩源,杨培举,等.深部软岩大变形巷道变径分区卸压围岩控制技术及应用[J].煤炭科学技术,2025,53(2): 53-67.
- [15] 王方田,刘超,翟景辉,等.深井松软围岩煤巷采动增跨效应及防控技术[J].采矿与岩层控制工程学报,2024,6(1): 80-90.
- [16] 曹安业,郭文豪,温颖远,等.托顶煤巷道锚固“梁-拱”结构分类及顶板冲击失稳机制[J].煤炭学报,2024,49(4):1752-1770.
- [17] 崔建军.深部沿空掘巷变形破坏机理及控制技术研究[J].煤炭科学技术,2017,45(7):12-17.
- [18] 何杰,程蓬,吴乐,等.坚硬顶板动压巷道远近应力场演化规律及调控技术[J].煤炭科学技术,2024,52(12):1-11.
- [19] SUN X M, CHEN F, MIAO C Y, et al. Physical modeling of deformation failure mechanism of surrounding rocks for the deep-buried tunnel in soft rock strata during the excavation [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 74: 247-261.
- [20] 侯公羽.基于开挖面空间效应的围岩-支护相互作用机制[J].岩石力学与工程学报,2011,30(S1):2871-2877.
- [21] 潘锐,王雷,蔡毅,等.深部巷道平顶稳定性分析及返修控制研究[J].采矿与安全工程学报,2021,38(4):756-765.
- [22] 潘锐,程桦,王雷,等.巷道浅层破碎围岩锚注加固承载特性试验研究[J].岩土力学,2020,41(6):1-12.
- [23] 赵宝福.深部大断面巷道围岩破坏机理及控制技术[J].煤炭工程,2025,57(2):61-67.