

DOI: 10.13606/j.cnki.37-1205/td.2025.01.023.

# 高应力大巷底鼓机理及其稳定性控制方法

常庆灵

(山西潞安集团余吾煤业有限责任公司, 山西 长治 046100)

**摘要:**针对余吾煤业 1 号回风大巷在高应力扰动下出现的巷道底鼓严重问题, 综合运用理论分析、数值计算和现场试验相结合的方法, 系统研究了高应力大巷底鼓机理及其稳定性控制方法。理论计算结果表明, 高应力巷道底板破坏深度达 1.35 m, 底板滑移面受到的滑动力达 3.11 MPa, 超过了底板砂质泥岩极限抗拉强度, 导致巷道底板发生底鼓。从高应力巷道底鼓控制角度出发, 提出了高应力巷道顶底板加强锚索与巷道两帮锚杆联合支护的巷道底鼓控制技术, 数值模拟结果表明巷道底鼓量可降低 67%, 有效控制底鼓的同时, 也可为巷道整体稳定提供支撑。通过现场试验, 研究提出的巷道底鼓控制方法可使回风大巷顶板下沉值降低 37%, 底鼓值降低 72%, 两帮变形量降低 53%, 有效保证了回风大巷的稳定。研究结果对于指导深部矿井高应力环境下巷道底鼓控制具有重要实践意义。

**关键词:**高应力巷道; 围岩变形; 底鼓; 稳定性; 支护

**中图分类号:**TD327.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-0797(2025)01-0129-06

## Mechanism of floor heave in high stress roadway and its stability control method

CHANG Qingling

(Yuwu Coal Industry Co., LTD., Shanxi Lu'an Group, Changzhi 046100, China)

**Abstract:** In view of the serious problem of floor heave in the No.1 return air main roadway of Yuwu Coal Industry under the disturbance of high stress, the mechanism of floor heave and its stability control method were systematically studied by combining theoretical analysis, numerical calculation and field test. The theoretical calculation results show that the failure depth of high-stress roadway floor reaches 1.35m, and the sliding force on the sliding surface of the floor reaches 3.11MPa, which exceeds the ultimate tensile strength of sandy mudstone and leads to floor heave. From the perspective of floor heave control in high-stress roadway, a floor heave control technology is proposed, in which the combined support of the roof and floor reinforced anchor cable and the two sides of the roadway are combined. The numerical simulation results show that the floor heave volume of the roadway can be reduced by 67%, which can effectively control the floor heave and provide support for the overall stability of the roadway. Through the field test, the proposed floor heave control method can reduce the roof subsidence value of the return air main roadway by 37%, the floor heave value by 72%, and the deformation of the two sides by 53%, which effectively ensures the stability of the return air main roadway. The research results have important practical significance for guiding the control of roadway floor heave under high stress environment in deep mine.

**Key words:** high stress roadway; surrounding rock deformation; bottom drum; stability; support

## 0 引言

随着采矿深度的不断扩展, 开采作业不可避免地遭遇更为复杂的高地应力挑战。这些条件下, 常见的底鼓大巷容易遭受岩石破裂和支护系统失败, 这直接危害着矿山安全运行与生产效能<sup>[1-4]</sup>。针对高应力环境下底鼓大巷的稳定性问题, 探索合理的支护技术应用, 对保障矿井生产的安全和效率具有至关重要的意义<sup>[5-9]</sup>。在这方面研究中, 王炯等提出采用切顶卸压和顶底板双梁联合支护技术来控制底鼓, 有效解决了端氏煤矿沿空留巷底鼓大变形问题<sup>[10]</sup>; 丁自伟等通过朗肯土理论建立采空区邻近巷道底板力学模型, 研究了双巷布置的工作面回采时采动应

力分布规律及塑性区范围, 提出采用爆破预裂切顶卸压技术对巷道变形进行控制<sup>[11]</sup>; 王鹏宇分析了厚煤层软弱底板沿空巷道的底鼓诱发机理, 以加固底板松软岩体为核心, 提出了“浅孔注浆加固+深孔高预应力锚索加强支护”的底鼓控制方案<sup>[12]</sup>; 王少伟针对巷道顶板淋水造成的软岩底板难以控制的问题, 指出底板破坏形式表现为浅部拉伸破坏及深部剪切破坏, 据此提出采用新型防水锚固剂进行锚杆索的锚固, 并设计了顶板、两帮及底板的支护方案, 应用效果良好<sup>[13]</sup>。综合文献分析, 目前研究主要集中在软岩巷道底鼓控制方面, 对于高应力巷道底鼓控制方法有待进一步研究。以余吾煤业所面临的高地应力矿井环境中的底鼓大巷作为研究背景, 在分析

巷道底鼓机理的基础上, 针对高应力巷道底鼓巷道的特征, 提出了切合余吾煤业实际情况的巷道底鼓控制方法, 旨在实现对高应力底鼓巷道形变的有效管理与控制。

## 1 工程背景

余吾煤业北风井东翼 1 号回风大巷断面尺寸为  $5.4\text{ m}\times 3.8\text{ m}$ , 地理位置为 5 号村庄南侧 450 m, 北界为未采掘煤体, 南侧毗邻已开挖辅助运输大巷, 东西两边分别为未开采煤层与在建的回风大巷。沿 3 号煤层顶板向煤层厚 6.65 m 方向, 以  $-6^\circ$  至  $+5^\circ$  倾角开挖, 本区域煤层是主要采掘对象, 特点为黑色粉块状结构。上覆岩层结构为细粒砂岩, 厚度达 4.30 m, 呈灰色, 以长石、石英构成, 并含有泥岩夹层。直接顶层为 15.50 m 厚的砂质泥岩, 颜色从灰到灰黑, 含细砂岩薄层及碳化植物残体。直接底层也是砂质泥岩, 厚 1.78 m, 易风化。基本底为细粒砂岩层, 厚 3.40 m, 颜色为灰色, 结构更加致密且坚硬。地质勘探结果显示, 本巷道与 F113 逆断层相距 290 m, 该断层断距为 1.0 m, 倾角  $70^\circ$ , 走向  $138^\circ$ , 在附近大巷中已显露。勘探资料表明顶板和底板不发育富水区, 水量以淋水和滴水为主。施工配备排沙泵确保有效排水, 防止底板受损。

## 2 巷道底鼓机理分析

在高应力扰动及临近采空区侧向支撑压力的双重作用下, 巷道围岩将发生变形甚至破坏, 可将巷道塑性破坏区看作是具有较低承载力的松散介质, 采用朗肯土压力理论对高应力巷道底鼓机理进行分析。

### 2.1 巷道底板受力分析

根据巷道所处的实际地质条件, 并进行适当简化, 采取巷道左侧底边为研究对象。如图 1 所示, 巷道底板主要承受均布载荷  $p$  的作用, 导致主要影响区域内 BEF 和 BGF 所示范围处于主动和被动双重影响的应力扰动区域内, 在多应力的叠加下产生沿 FG 段的斜向上的应力  $T$ , 当所受应力超过底板岩层的极限抗拉强度后, 导致巷道底板 BG 发生塑性变形直至破坏, 使巷道底板向上鼓起。

根据朗肯土压力理论, 将 GF 段看作是理想挡土墙, 此时该段各点所受的主动压力与被动压力表达式如式 (1)、式 (2):

$$\sigma_a = (p + \gamma h) K_a \quad (1)$$

$$\sigma_p = \gamma h K_p \quad (2)$$

式中:  $\gamma$  为岩层容重,  $\text{kN/m}^3$ ;  $p$  为均布载荷,  $\text{kN/m}^2$ ;  $h$  为底板任意点深度, m;  $K_a$  为主动压力系数,  $K_a = \tan^2(45^\circ - \varphi/2)$ ;  $K_p$  为被动压力系数;  $K_p = \tan^2(45^\circ + \varphi/2)$ ;  $\varphi$  为内摩擦角,  $^\circ$ 。

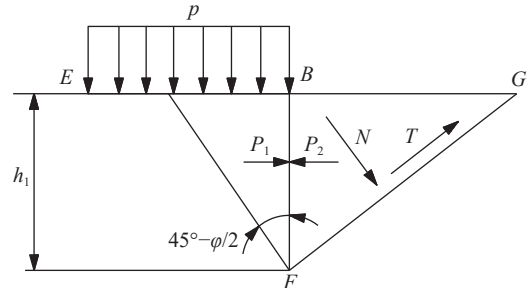


图 1 巷道底板受力分析图

巷道底板 F 所在深度位置受力达到极限平衡, 此时  $\sigma_p = \sigma_a$ , 对于底板 BF 段处于塑性区域, 此时有  $\sigma_a > \sigma_p$ , 对于底板 F 以下位置处于弹性区域, 此时有  $\sigma_p > \sigma_a$ 。当底板岩层达到极限平衡状态时, 此时底板破坏深度表达式如式 (3):

$$h_1 = \frac{p K_a}{\gamma K_p - K_a} \quad (3)$$

当极限平衡条件被打破以后, 底板岩层 BEF 区域与 BFG 区域分别承受主动压力与被动压力作用, 此时 BFG 区域所收到的滑动推力  $P_{12}$  如式 (4):

$$p_{12} = p_1 - p_2 = (\gamma h_1^2/2 + p h_1) K_a - \gamma h_1^2 K_p/2 \quad (4)$$

式中:  $P_1$  为主动压力;  $P_2$  为被动压力。

根据底板岩层实际受力状态, 可将滑动推力  $P_{12}$  分解为沿着 FG 面的法向力  $N$  和切向力  $T$ , 由此得到该面的滑动力  $T_1$  表达式如式 (5)~式 (7):

$$T_1 = T - N \tan \varphi \quad (5)$$

$$N = p_{12} \sin(45^\circ - \varphi/2) \quad (6)$$

$$T = p_{12} \cos(45^\circ - \varphi/2) \quad (7)$$

将式 (4)、(6)、(7) 带入式 (5) 可得有效滑动力  $T_1$  表达式如式 (8):

$$T_1 = \frac{(\gamma h_1^2/2 + p h_1) K_a - \gamma h_1^2 K_p/2}{2 \cos(45^\circ - \varphi/2)} \quad (8)$$

由公式 (8) 可看出, 对于覆岩容重与内摩擦角一定的条件下, 位于塑性区内的 FG 面所受到的有效滑动推力主要底板破坏深度、底板所受均布载荷及主动与被动侧压力系数密切相关。根据北风井东

翼1号回风大巷实际工程条件,内摩擦角 $\varphi=23.18^\circ$ ,覆岩容重 $\gamma=2.6\times 10^3\text{ kN/m}^3$ ,巷道底板帮侧所受到的均布载荷 $p=15.3\text{ 103 kN/m}^2$ ,将相关参数带入公式(3)与公式(8),计算得 $h_1=1.35\text{ m}$ , $T_1=3.11\text{ MPa}$ 。根据理论计算结果,高应力巷道底板破坏深度达 $1.35\text{ m}$ ,底板滑移面受到的滑动力达 $3.11\text{ MPa}$ ,而直接底砂质泥岩的极限抗拉强度为 $2.55\text{ MPa}$ ,小于滑移面的滑动力,导致巷道底板破坏,发生底鼓。

## 2.2 巷道底鼓机理

北风井东翼1号回风大巷在井下工作面回采过程中,会不断遭受高构造应力扰动影响,致使巷道承受较大的矿压,底板所承受的被动侧压力系数要远大于主动侧压力系数。由于回风大巷直接底为 $1.78\text{ m}$ 的砂质泥岩,比较软弱,这样巷道在采动应力与高构造应力持续扰动下,巷道两帮发生变形的同时,还会将高应力用巷帮弹性区域传递至底板软弱岩层中,致使直接底软弱的砂质泥岩层沿着底板滑动面产生的滑动推力超过了其极限抗拉强度,最终导致巷道底板发生显著变形甚至破坏,形成底鼓。

## 3 高应力大巷底鼓控制方法

### 3.1 大巷变形特征

根据现场观测东翼1号回风大巷变形情况,其变形特点主要表现为以下几个方面:

1) 侧壁内挤。监测数据显示侧壁内凸及纵向裂缝现象显著,伴有片状剥落。

2) 顶板变形。顶板呈尖顶形或中央剪裂,与侧壁接合区破坏显著。这是由于巷顶承压能力不足,导致的不均匀应力分布。

3) 顶压破坏。垂直压力主导下,顶板下沉和冒落现象首发于中心,顶角易断裂,归因于肩部岩块剪切失稳。

4) 巷道底鼓。底板未封导致剪切滑动和上部碎石挤压,形成流变性底鼓。主因包括围岩应力上升、泥岩膨胀及采动影响。

5) 应力响应。原岩应力大,挖掘卸载引发迅速变形,修复初期变形速率和断面收缩率高,呈现剪切型损坏。

6) 围岩时效变形。变形持续且发展至加速阶段,未及时补强可能导致坍塌。

### 3.2 大巷底鼓控制技术

#### 3.2.1 底鼓控制思路

锚杆支护作为一种有效的地下工程维护手段,

在煤矿巷道围岩控制中已广泛应用并取得成效。底板锚杆在矿井底鼓治理中表现良好,该技术通过底板岩层与稳定岩层联结,形成组合梁结构,从而增强整体抗弯能力。然而,在高应力环境下,传统锚杆支护的锚固长度不足,无法完全覆盖底板梁的破坏范围。加之巷道底板加固时存在滞后性,当锚杆完全发挥作用时,围岩破坏区已形成,锚杆锚固力因此大幅下降。此外,组合梁的强度不足以抵抗高地应力导致的深部岩体破坏,致使锚固区域新的变形破坏发生。从结构力学角度考虑,巷道底鼓控制需要增强底板岩层间的相互作用力,提升结构岩体强度,以有效控制巷道底鼓变形。为此,提出对底板采取加强锚索支护,这种支护方式增强效果不仅减少了岩体的弯曲变形,也缓解了轴向滑移,提升了巷道底板整体结构的稳定性。

#### 3.2.2 巷道底鼓控制方法

针对回风大巷变形控制需要,研究提出高应力巷道顶底板加强锚索与两帮锚杆联合支护的巷道底鼓控制方法。巷道顶板支护为每排采用 $\varphi 22\text{ mm}$ 螺纹钢锚杆7根,锚杆长度 $2400\text{ mm}$ ,间排距 $800\text{ mm}\times 800\text{ mm}$ ,顶角锚杆距帮 $300\text{ mm}$ ,顶角锚杆向两帮倾斜 $20^\circ$ 角;顶锚索采用 $\varphi 18.9\text{ mm}$ 高强度预应力锚索3根,锚索长度 $6.3\text{ m}$ ,锚固长度 $2200\text{ mm}$ ,锚杆间排距 $1200\text{ mm}\times 1500\text{ mm}$ 。两帮支护采 $\varphi 22\text{ mm}$ 螺纹钢锚杆5根,锚杆长度 $2400\text{ mm}$ ,间排距 $850\text{ mm}\times 850\text{ mm}$ ,帮角锚杆距帮 $200\text{ mm}$ ,帮角锚杆向两帮倾斜 $20^\circ$ 角,锚固长度 $1200\text{ mm}$ 。巷道底板采用 $\varphi 18.9\text{ mm}$ 高强度预应力锚索支护,锚索长度 $4.3\text{ m}$ ,间排距 $1200\text{ mm}\times 1500\text{ mm}$ ,每排布置3根锚索。通过底板补打锚索,可将底板直接底软弱泥质砂岩层与基本底坚硬细砂岩层铰接在一起,形成组合梁结构,一次增加巷道底板岩层的稳定性,回风大巷支护断面如图2所示。

## 4 巷道底鼓控制数值模拟分析

### 4.1 数值模型构建

为进一步分析所提出的高应力巷道加强支护后底鼓控制的有效性,采用Flac<sup>3D</sup>水数值分析软件对回风大巷加强支护前后巷道变形控制效果进行分析。数值模拟中构建2种模拟方案,即巷道底板不进行补强支护方案(原方案)与巷道底板进行锚索补强支护方案(新方案)。数值计算模型采用平面应变模型,模型尺寸为 $100\text{ m}\times 63\text{ m}$ ,共划分为 $156340$

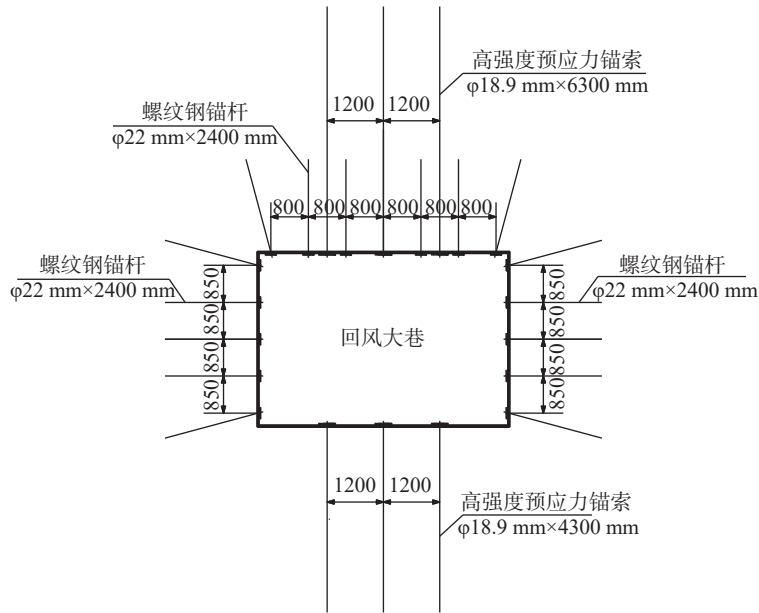


图 2 1 号回风大巷支护断面图

个单元，模型上方施加均布荷载模拟上覆岩层压力，左右边界为水平位移约束，底部为竖直位移约束，数值模拟用岩石力学参数见表 1。

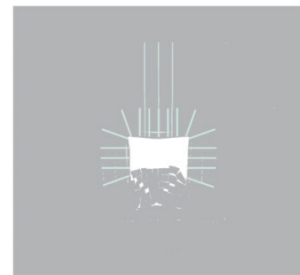
表 1 岩层物理力学参数

岩石名称	容重/ kN·m <sup>-3</sup>	抗压强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	弹性模量/ MPa	泊松比	内聚力/ MPa	内摩擦 角/°
细粒砂岩	2750	75.69	6.27	32.12	0.25	7.13	34.74
粉砂岩	2700	48.265	4.15	19.21	0.21	2.77	28.10
3号煤	1670	8.47	1.05	3.15	0.29	2.23	23.02
砂质泥岩	2600	32.54	2.54	21.68	0.23	2.49	23.18
细粒砂岩	2750	86.92	8.35	32.04	0.24	8.97	38.42

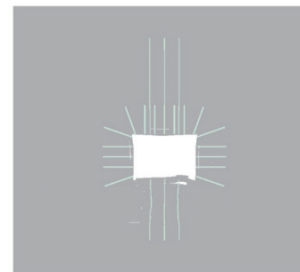
## 4.2 数值模拟结果

### 4.2.1 巷道围岩塑性区分析

不同支护方案下巷道底板塑性区分布情况见图 3。原方案中，巷道底板未进行加强支护时，底板塑性区范围较大，出现明显的离层现象；新方案中，巷道底板采用锚索加强支护后，底板塑性区范围显著降低，仅在近巷道底板位置出现小范围的离层，采用加固措施能有效遏制底鼓变形。这种支护方式不仅可以抑制底板的变形，还对保持巷道顶板与侧壁的稳定具有一定的控制作用。在高应力环境的巷道中，底鼓控制与顶板及侧壁稳定性是相互依存的，对巷道底板实施有效支护后，能显著限制巷道顶板及两帮变形的发展，底板的稳定为巷道整



(a) 原方案



(b) 新方案

图 3 巷道塑性区分布图

体结构的稳定提供了有效保障，减少了变形风险。

### 4.2.2 巷道垂直位移分析

不同支护方案下巷道垂直位移分布情况如图 4 所示。原方案中，巷道底板未进行加强支护，导致巷道底板呈现由帮角向巷中心鼓起，底板最大底鼓量达 1350 mm，出现在巷道中心偏向右侧位置，巷道顶板最大下沉量达 380 mm；新方案中，巷道底板采用锚索加强支护后，巷道底板底鼓量得到了显著控制，最大底鼓位置出现在巷道中心偏向右侧位置

达 450 m，此时顶板最大下沉量为 240 m，巷道顶底板变形可得到有效控制。

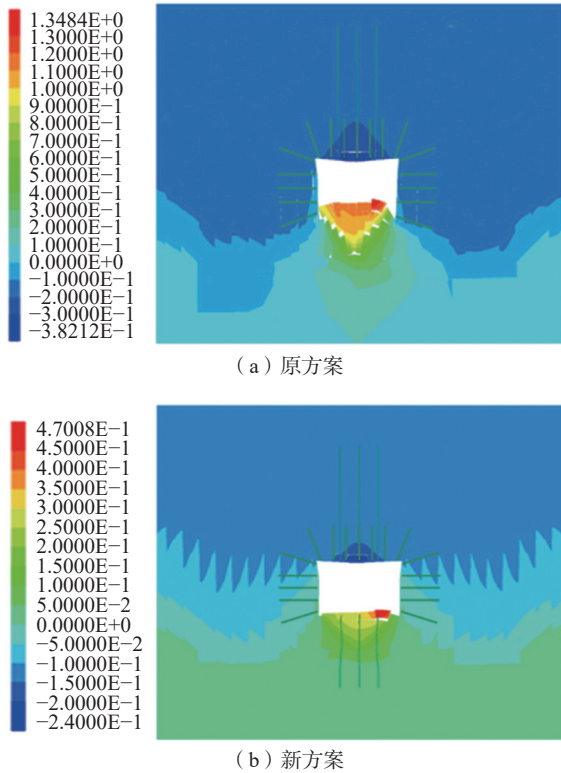


图 4 巷道垂直位移分布图

### 4.2.3 巷道水平位移分析

不同支护方案下巷道水平位移分布情况如图 5 所示。在原方案中，巷道底板未进行加强支护，巷道左邦最大位移量达 400 mm，右帮最大位移量达 300 mm；新方案中，巷道底板采用锚索加强支护后，巷道左邦最大位移量达 225 mm，右帮最大位移量达 200 mm，巷道两帮变形得到有效控制。

综合数值模拟结果分析，对巷道底板采用高强度预应力锚索加强支护后，巷道底鼓量降低幅度最为显著，底鼓量降低了 67%，对底板的加固不单是对其自身稳定性的控制，而是对整个巷道的全面保

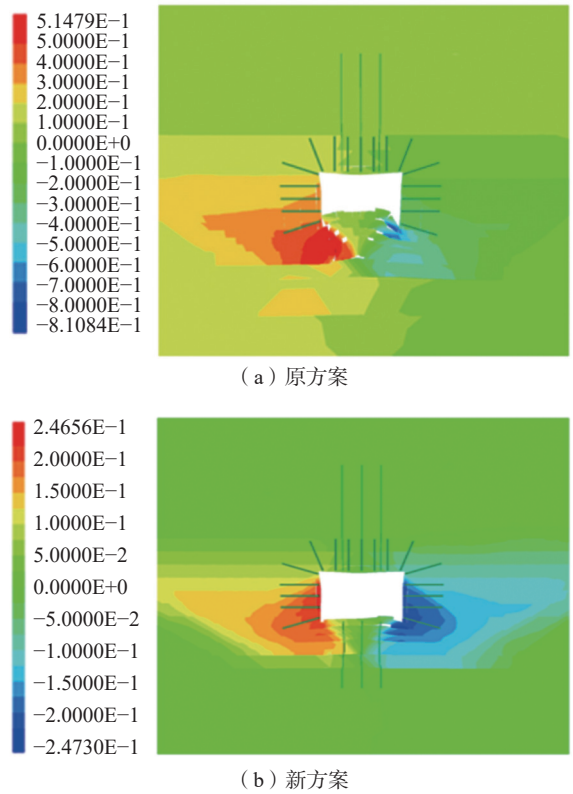


图 5 巷道水平位移分布图

障，特别是对顶板和侧壁的稳定提供了有力支撑，这种全面稳定性与底鼓控制的效果有着直接的关系。采用支护方案可以完全满足巷道围岩的稳定性控制要求，可以较好的发挥锚杆与锚索的锚固力，在工程实践中，还可以通过在底锚索范围内注浆进一步增强底板围岩的完整性。

## 5 现场试验效果分析

研究提出的高应力巷道底鼓控制在余吾煤业东翼 1 号回风大巷进行了现场试验，该技术实施前后巷道变形监测结果如图 6 所示。回风大巷底板进行高强度预应力锚索加固前，底板底鼓值达到了 1350 mm，除了巷道底板，巷道顶板及两帮位移值

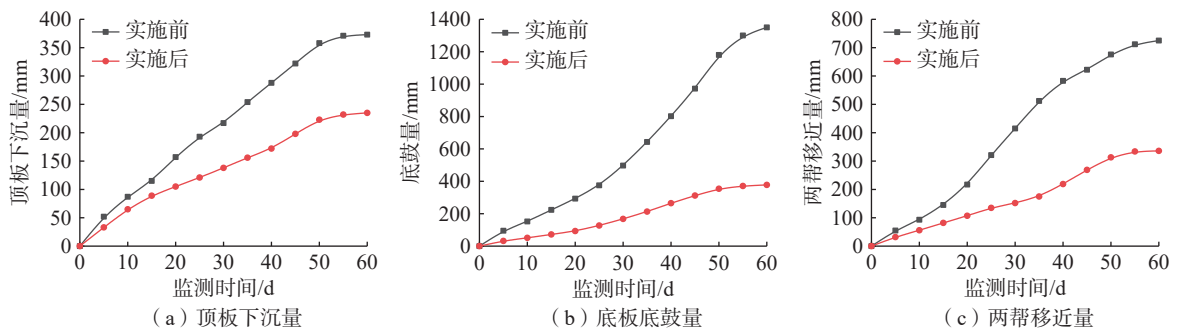


图 6 巷道变形监测结果图

均比较大,分别为373、750 mm。对巷道底板进行加强支护后,巷道整体变形得到显著的控制,其中巷道底鼓值为378 mm,巷道顶板及两帮位移值分别为235、353 mm。综合比较,1号回风大巷顶板下沉值降低37%,底鼓值降低72%,两帮变形量降低53%,根据现场试验效果,回风大巷围岩变形得到了有效控制,特别是巷道底鼓控制效果最为显著,有效保证了回风大巷的稳定。

## 6 结论

1) 通过理论分析,余吾煤业东翼1号回风大巷底板破坏深度达1.35 m,底板滑移面受到的滑动力达3.11 MPa,超过了直接底砂质泥岩的极限抗拉强度,巷道在采动应力与高构造应力持续扰动下,巷道两帮发生变形的同时,导致巷道底板发生显著变形甚至破坏,形成底鼓。

2) 通过分析高应力大巷变形特征,提出了巷道顶底板加强锚索与两帮锚杆联合支护的巷道底鼓控制方法。结合数值模拟分析,对巷道底板采用高强度预应力锚索加强支护后完全满足巷道围岩的稳定性控制要求。

3) 通过现场工程试验,试验结果与数值分析结果得到了良好的验证,回风大巷围岩变形得到了有效控制。

4) 对于高应力条件下的底鼓巷道,后续将进一步优化与改进锚杆(索)支护参数,考虑锚杆(锚索)与围岩的相互作用、锚杆(锚索)的布置密度、角度及锚固强度等因素,以实现最佳的支护效果,进一步提高底鼓巷道围岩的稳定性。

### 参考文献:

[1] 姚韦靖,刘雨珊,王成军,等.基于TRIZ理论的许疃矿南翼探水巷底鼓控制技术研究[J].煤炭工程,2023,55(10):

92-97.

- [2] 张虎,弓培林,史明将,等.不同底板岩性条件下煤柱宽度对巷道底鼓影响[J].煤炭技术,2023,42(5): 46-50.
- [3] 徐晓鼎,周跃进,高玉兵,等.基于“三铰拱-弹簧”模型的复合底板巷道非对称底鼓机制及卸压控制[J].岩石力学与工程学报,2023,42(6): 1421-1433.
- [4] 冯利宁,丁斌,孙利辉,等.深井巷道滑移底鼓机理与钢管混凝土桩治理底鼓技术研究[J].煤炭工程,2023,55(4): 58-64.
- [5] 关常军.元甲煤矿软岩巷道底鼓机理及控制技术研究[J].煤矿现代化,2022,31(2): 33-36.
- [6] 曹璐.基于新型注浆材料的巷道底鼓控制技术[J].煤矿现代化,2022,31(6): 34-37.
- [7] 刘玉卫,商铁林,张亚峰,等.采掘影响下巷道底板的破坏分析与底鼓治理[J].黑龙江科技大学学报,2021,31(5): 546-553.
- [8] 鲁健,弓培林,李鹏.深井软岩巷道底鼓机理与钻孔卸压技术研究[J].矿业安全与环保,2019,46(6): 35-41.
- [9] 王羽扬,刘勇,王沉,等.深井软岩巷道底鼓变形破坏机理及控制技术[J].地下空间与工程学报,2021,17(S1): 411-418.
- [10] 王炯,陈鹏程,刘天赏,等.大采高工作面沿空留巷底鼓控制技术研究及应用[J].煤炭技术,2023,42(12): 6-12.
- [11] 丁自伟,王少轩,王庆阳,等.软岩巷道底鼓机理及其稳定性控制研究[J].煤炭工程,2023,55(7): 102-109.
- [12] 王鹏宇.厚煤层软弱底板沿空巷道底鼓控制技术研究[J].煤,2023,32(6): 95-98.
- [13] 王少伟.黑龙江煤矿淋水软岩巷道底鼓控制技术研究[J].山东煤炭科技,2023,41(7): 29-31.

### 作者简介:

常庆灵(1979-),男,山西长子人,本科,工程师,从事生产技术管理工作。

(收稿日期:2024-1-16)