

浅埋弱胶结层状底板回采巷道底臃控制技术研究

袁智强¹, 贺帅¹, 靳占飞¹, 郭鹏飞², 王阁³, 张华磊⁴

(1. 内蒙古伊泰煤炭股份有限公司, 内蒙古鄂尔多斯 017000; 2. 内蒙古仲泰塔拉壕矿业有限公司,

内蒙古鄂尔多斯 017000; 3. 泰安泰烁岩层控制科技有限公司, 山东泰安 271021;

4. 安徽理工大学矿业工程学院, 安徽淮南 232000)

摘要:为解决弱胶结层状底板严重的底臃问题,以塔拉壕煤矿工作面辅运巷道为工程背景,采用现场调研、数值模拟与工业试验相结合的方法,研究层状底板稳定性及其控制对策。研究表明:在工程扰动下,层状底板自浅至深依次形成强扰动区、弱扰动区和非扰动区。强扰动区岩体变形是强烈底臃现象的主因,弱扰动区起变形调控作用,非扰动区为主要承载区,实现“三区”协同承载是控制关键。分层厚度对层状底板稳定性具有显著的调控作用,厚度由0.2 m增至0.5 m可显著提高底板完整性与承载能力,减小强扰动区范围,底板最大变形由631.5 mm降至253.2 mm,底臃现象明显改善。根据围岩协同控制技术,提出“高强顶帮支护+全断面喷浆封闭+底板锚注”支护体系。数值模拟与工程实践的结果表明,该体系可形成顶-帮-底协同承载结构,有效抑制底板大变形的出现。

关键词:弱胶结软岩; 底臃; 层状底板; 分层厚度; 围岩控制

中图分类号: TD353

文献标志码: A

文章编号: 1004-3918(2026)02-0392-08

Research on the Control Technology of Floor Heave in Shallow-Buried Weakly Cemented Layered Floor Mining Roadway

YUAN Zhiqiang¹, HE Shuai¹, JIN Zhanfei¹, GUO Pengfei², WANG Ge³, ZHANG Hualei⁴

(1. Inner Mongolia Yitai Coal Co. Ltd., Ordos 017000, Inner Mongolia, China;

2. Inner Mongolia Zhongtai Tarahao Mining Co. Ltd., Ordos 017000, Inner Mongolia, China;

3. Tai'an Taishuo Rock Formation Control Technology Co. Ltd., Tai'an 271021, Shandong China;

4. School of Mining Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232000, Anhui China)

Abstract: To solve the serious problem of floor heave in weakly cemented layered floor, taking the auxiliary transportation roadway of the Talahao coal mine working face as the engineering background, by combining field investigations, numerical simulations, and industrial experiments, it explores the stability of layered floors and their control strategies. The research reveals that under engineering disturbances, the layered floor sequentially forms a strong disturbance zone, a weak disturbance zone, and a non-disturbed zone from shallow to deep. The deformation of the rock mass in the strong disturbance zone is the primary cause of severe floor heave, while the weak disturbance zone plays a regulatory role in deformation. The non-disturbed zone serves as the main load-bearing area. Making the coordinated bearing capacity of these “three zones” is the key to control. The layer thickness

收稿日期: 2025-08-20

修回日期: 2025-10-05

接受日期: 2026-01-05

项目基金: 安徽省教育厅科技项目(2024AH050352); 安徽理工大学引进人才基金(2023yjrc65); 安徽省优秀科研创新团队(2023AH010023)

作者简介: 袁智强(1986-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为煤矿安全生产和技术管理

通信作者: 张华磊(1983-), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为矿山压力与岩层控制、软岩巷道支护, E-mail: hlzhang1122@126.com

引用格式: 袁智强, 贺帅, 靳占飞, 等. 浅埋弱胶结层状底板回采巷道底臃控制技术研究[J]. 河南科学, 2026, 44(2): 392-399.

Yuan Z Q, He S, Jin Z F, et al. Research on the control technology of floor heave in shallow-buried weakly cemented layered floor mining roadway[J]. Henan Science, 2026, 44(2): 392-399.

significantly influences the stability of the layered floor. Increasing the thickness from 0.2 m to 0.5 m markedly enhances floor integrity and load-bearing capacity, reduces the extent of the strong disturbance zone, and decreases the maximum floor deformation from 631.5 mm to 253.2 mm, leading to a notable improvement in floor heave conditions. Based on the joint control technology of surrounding rock, a support system comprising “high-strength roof and rib support + full-section shotcrete sealing + floor bolting and grouting” is proposed. Numerical simulations and engineering practice demonstrate that this system can form a coordinated roof-rib-floor bearing structure, effectively suppressing large-scale floor deformation.

Key words: weakly cemented soft rock; floor heave; layered floor; layer thickness; surrounding rock control

0 引言

弱胶结软岩成岩时间短,胶结程度低,岩体具有松散软弱的特点,在该地质条件下,巷道围岩控制难度巨大^[1-2]。弱胶结软岩在沉积过程中形成典型的层状结构,层状结构对岩体的损伤破坏会产生显著的影响^[3-4]。在巷道围岩承载结构中,裸露的层状底板为围岩应力和变形的释放提供了空间,底板逐层向下破坏,呈现剧烈的底臌显现,严重制约了工作面的正常生产^[5-6]。

针对巷道的底臌问题,行业内专家开展了大量的研究工作,取得了诸多研究成果。刘泉声等^[7-8]以深井软岩巷道底臌问题为对象,通过对底板改性加主动支护的手段,调控围岩应力和变形的释放机制,深井巷道底板变形起到良好的控制效果。王宏伟等^[9]基于大量现场和试验数据,分析底臌基本特征,将巷道底臌类型进行了全面的分类。何满潮等^[10-11]提出锚网索耦合支护技术,增加巷帮和顶底板岩体的强度,限制底板大变形,起到了良好的底臌控制效果。王卫军等^[12-13]采用强化巷帮和底角的支护手段,大幅提高了深井软岩巷道底板的稳定性。康红普等^[14]提出主动卸压的技术手段,转移巷道围岩高应力,改善围岩应力环境,实现巷道的长期稳定。孙晓明等^[15]针对深埋层状岩体巷道,建立力学分析模型,从围岩应力状态角度分析底板的稳定性,并提出相应的控制措施。神文龙等^[16-17]采用底板锚

杆,构建围岩承载系统,实现围岩与支护结构协同承载,有效限制了底板变形。上述研究成果为弱胶结层状底板的治理奠定了良好的基础,然而,在工程扰动影响下,层状底板具有独特的变形破坏响应,上述研究成果并不完全适用。本文在对层状底板失稳过程分析的基础上,针对底板的变形破坏特征提出相应的控制对策,保障巷道在使用过程中的稳定。

1 工程背景

塔拉壕煤矿 3-1 煤平均埋深 125 m,平均煤厚 3.4 m,煤层结构简单,局部含 1~2 层夹矸。直接底为 10.5 m 厚的泥岩,层状结构显著。直接顶为 5.2 m 厚的砂质泥岩,砂泥质结构,具有显著的层状特性。如表 1 所示,巷道顶底板岩层性质软弱,直接顶和直接底单轴抗压强度小于 25 MPa,泥岩和砂质泥岩遇水后软化变形,长时间浸水后出现崩解现象,致使顶底板极易产生大变形。

如图 1 所示,顶板砂质泥岩黏土矿物含量为 18.1%,底板泥岩黏土矿物含量为 41.6%,相较于顶板,底板泥岩具有更强的亲水性,在围岩应力和水理弱化作用下,更易诱发失稳现象。工作面巷道布置如图 2 所示,3207 工作面辅运巷道在其服务期间受到掘巷扰动和采动影响,巷道原支护设计未对底板设计进行针对性的控制方案,在生产过程中,3207 工作面辅运巷道出现严重的底臌现象。

如图 3(a)所示,巷修期间揭露的底板泥岩具有

表 1 围岩力学参数

Tab.1 Mechanical parameters of surrounding rock

岩性	厚度/m	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/GPa	单轴抗压强度/MPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/°	抗拉强度/MPa
砂质泥岩	11.1	2340	3.02	21.80	3.43	40	1.16
粉砂岩	8.4	2630	7.93	41.80	4.16	41	3.63
砂质泥岩	5.2	2340	3.02	21.80	3.43	40	1.16
3-1 煤	3.4	1220	0.20	1.94	2.67	35	0.28
泥岩	10.5	2273	2.87	19.92	3.38	42	1.01

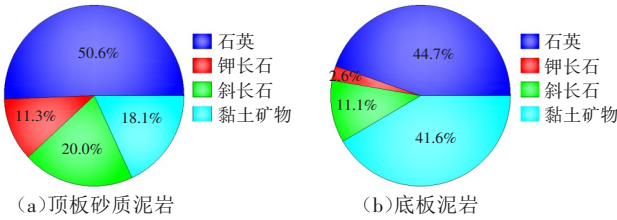


图1 岩石组分

Fig.1 Rock composition

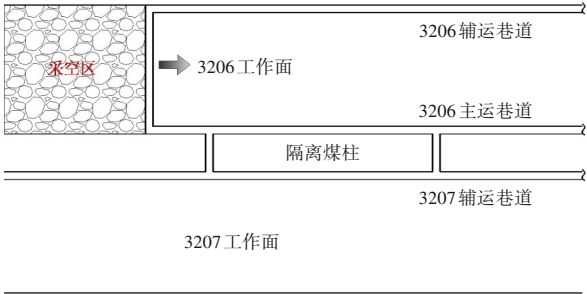


图2 工作面布置

Fig.2 Layout of working face roadway



(a)底板层状属性

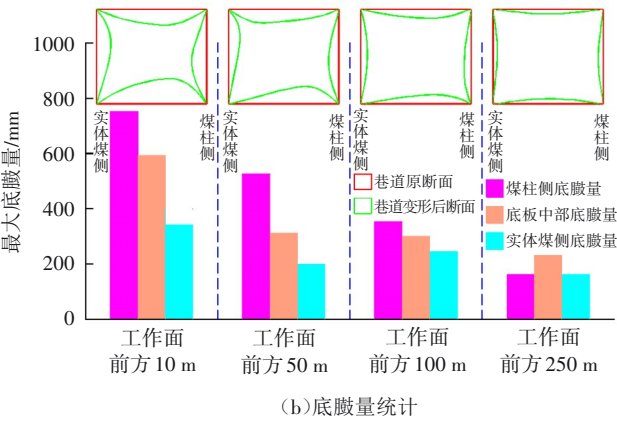


图3 层状底板变形破坏情况

Fig.3 Deformation and damage of the layered floor

显著的层状特性,由于地质条件的差异,底板分层厚度在0.2~0.5 m之间。在工程开挖扰动影响下,底板呈逐层渐进式破坏。对巷道不同区域的底臃量进行统计分析,如图3(b)所示。底板变形量与工作面推进位置具有显著的时空关联性,工作面前方10 m处,底板的最大变形接近800 mm,最大变形位于煤

柱侧底板。随着测点远离工作面,工作面采动影响逐渐降低,底板的最大变形量逐渐减小,底板逐渐由非对称变形过渡到对称式变形。工作面前方250 m处,底板最大变形量降低至240 mm。

2 层状底板稳定性分析

2.1 数值模型构建

采用FLAC3D中的Interface单元模拟岩层结构面,实现层状底板的数值化表征,结构面的力学参数如表2所示。为避免边界效应的影响,同时加快计算速度,模型尺寸设计为40 m×1 m×27 m($x \times y \times z$)。根据位移边界条件,固定模型四个垂直面的法向位移,固定模型底面的位移。根据应力边界条件,在模型顶部施加3.0 MPa的垂直应力。模型采用摩尔-库伦强度准则,煤层顶底板岩层参数取值如表1。

表2 结构面力学参数的选取

序号	法向刚度/GPa	切向刚度/GPa	抗拉强度/kPa	黏聚力/kPa	摩擦角/°
煤岩界面	10	8	6	80	24
层理界面	12	9	12	100	25

2.2 数值计算方案

根据底板实际破坏深度,并考虑到数值软件计算速度,确定层状底板的模拟范围为3 m,为分析分层厚度对层状底板稳定性的影响,模拟的底板分层厚度设置为0.2、0.3、0.4、0.5 m,大于0.5 m厚度的分层工程中已视为软弱夹层,故更厚的分层不考虑。

2.3 底板变形破坏特征

如图4所示,层状泥岩底板完整性差,承载能力不足,在围岩应力的驱动下,极易产生大范围的塑性破坏区。底板浅部岩体是围岩应力和变形释放的主要区域,形成强扰动区。强扰动区岩体发生破坏后,塑性区逐层向下发展。强扰动区下方为弱扰动区,该区域分层受到周围岩体的夹持作用,变形破坏程度显著降低,并具备一定的承载性能,对底板的变形具有一定的控制效应。弱扰动区域以外为非扰动区,该区域是围岩承载的主要区域,层状底板的治理即实现强扰动区、弱扰动区和非扰动区的“三区”协同承载。

分层厚度的大小对层状底板的稳定性具有显著的影响。分层厚度为0.2 m时,底板层状特性显著,底板的完整性大幅度降低,承载能力显著削弱,底板形成大范围的强扰动区。当层状底板分层厚度提高至0.5 m,底板岩体的完整性提高,层状底板抵抗变

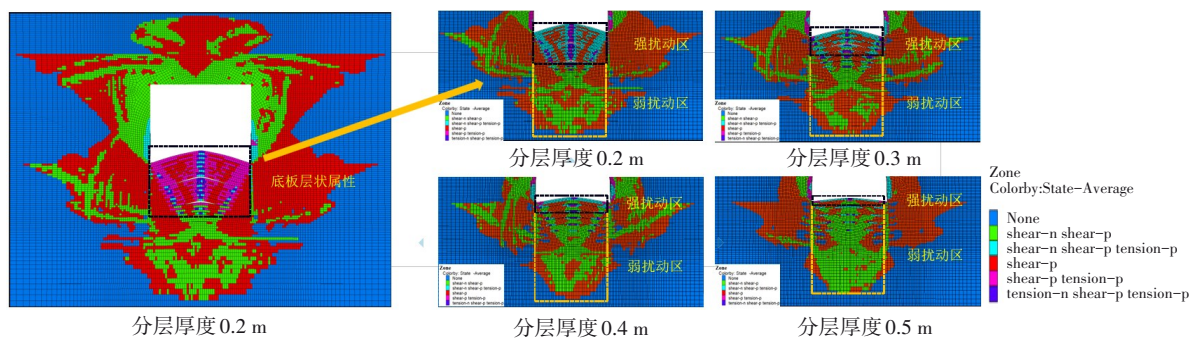


图4 层状底板破坏特征

Fig.4 Failure characteristics of layered floor

形的能力大幅提高,强扰动区的扩展得到了抑制,剧烈的底臌现象消失。

不同分层厚度表层底板的变形情况如图5(a)所示,在巷道跨中位置,底板变形量最大,强扰动区作为底板大变形的主要来源,其变形量通常大于200 mm。分层厚度由0.2 m增加到0.5 m,底板的完整性提高,承载能力增强,强扰动区的范围显著减小,底板的最大变形量由631.5 mm减小至253.2 mm。提取不同分层厚度底板不同深度处的最大变形量,如图5(b)所示。分层厚度为0.2 m时,底板在2.4 m

处由强扰动区过渡至弱扰动区,分层厚度增加至0.5 m,底板在1.0 m即进入弱扰动状态,表明提高岩体完整性能显著提高层状底板的稳定性状态。强扰动区岩体的剧烈变形是造成层状底板失稳的根本原因,层状底板的治理即实现该区域岩体由强扰动状态过渡到弱扰动状态。

3 底板力学特性分析

层状底板受工程开挖扰动影响后形成的强扰动区是底板大变形的主要来源,通过底板锚注技术,提高层状岩体的完整性,使底板岩梁由叠加梁结构过渡至组合梁结构,建立如图6所示的底板力学模型,将底板载荷简化为均布载荷 q ,设底板跨度为 B ,底板刚度为 EI ,底板承载水平载荷为 F_x ,底板任意截面处的挠度为 ω ,则底板弯矩为:

$$M(x) = \frac{1}{2}qx^2 - \frac{1}{2}qBx - F_x\omega。 \tag{1}$$

由材料力学挠曲微分方程 $EI\omega''=M(x)$,代入式(1),并令 $\beta^2=F_x/EI$,可得:

$$\omega'' + \beta^2\omega = \frac{q\beta^2}{2F_x}(x^2 - Bx)。 \tag{2}$$

代入边界条件 $\omega_{x=0}=0, \omega_{x=B}=0$ 求解上述微分方程可得底板挠曲表达式:

$$\omega = \frac{qEI}{F_x^2} \cos \beta x + \frac{qEI}{F_x^2} \tan \frac{\beta B}{2} \sin \beta x + \frac{q}{2F_x}x^2 - \frac{qB}{2F_x}x - \frac{qEI}{F_x^2}。 \tag{3}$$

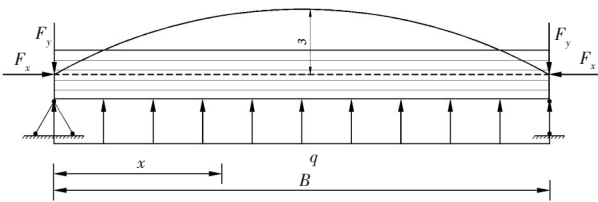
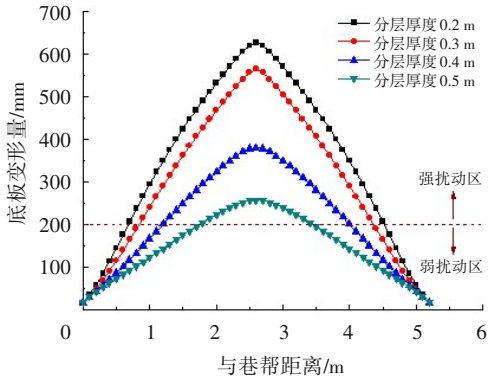
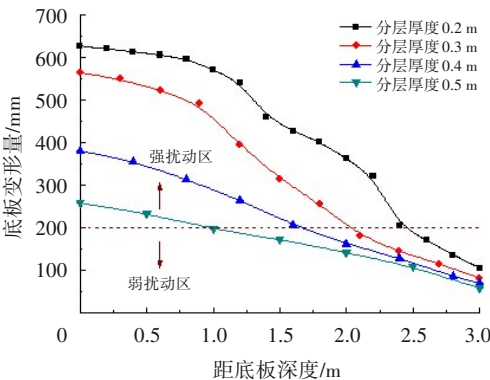


图6 底板力学模型

Fig.6 Mechanical model of the layered floor



(a)表层底板变形



(b)不同深度处底板变形

图5 底板变形情况

Fig.5 Deformation of the floor

根据底板挠曲变形公式可知,底板的变形受底板跨度和底板刚度的制约,绘制不同工况下底板的变形曲线,如图7所示。如图7(a)所示,随着刚度增加,底板的抗变形能力显著提升,底板刚度由 $10\text{ MN}\cdot\text{m}^2$ 增加至 $70\text{ MN}\cdot\text{m}^2$,底板的最大变形量由 2.99 m 减小至 0.25 m 。巷道开挖完成,底角出现应力集中,该处岩体出现塑性破坏,失去承载能力,底板实际跨度增加。如图7(b)所示,底板跨度由 2.5 m 增加至 6.5 m ,底板最大变形量由 0.015 m 增大至 0.80 m 。由此可知,采用针对性的支护对策,提高底板岩层的弹性模量和黏结强度,增加底板的抗弯刚度,同时提高巷道底角的力学属性,增强其承载能力,控制巷道的宽度,是实现层状底板由非稳态向稳态转变的关键。

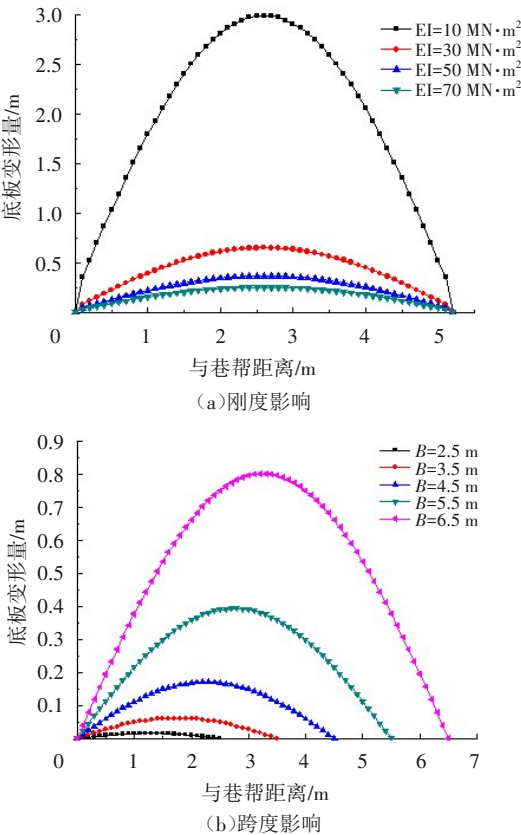


图7 底板的变形特性

Fig.7 Deformation characteristics of the floor

4 围岩协同控制技术

4.1 控制对策

基于层状底板的变形破坏特征,为充分发挥支护结构体的承载性能,提出强帮固顶控底为主的围岩协同控制对策:①通过锚杆锚索的主动支护作用,使浅部围岩和深部围岩能够形成协同承载结构,提

高顶板的承载能力,防止顶板载荷通过巷帮向底板转移。②采用锚杆对软弱巷帮进行支护和加固,提高煤帮的强度,从而有效限制围岩载荷向底板转移。③通过底板锚注技术,提高软弱结构面的力学属性,降低分层弱化效应对底板的影响,促使强扰动区向弱扰动区转化,实现层状底板“三区”协同承载。④全断面喷射混凝土,及时封闭围岩,充填围岩裂隙,防止水理弱化作用对软岩承载性能的劣化作用,使支护结构体能够协同承载,抵抗变形。

4.2 支护结构参数

根据围岩协同控制技术,构建以“高强顶帮支护+全断面喷浆封闭+底板锚注”为核心的支护体系,具体支护参数如图8所示。

1)顶板支护。顶板锚杆为 $\Phi 20\text{ mm}\times 2500\text{ mm}$ 左旋无纵筋螺纹钢,间排距为 $900\times 1000\text{ mm}$,锚杆预紧力设置为 $200\text{ N}\cdot\text{m}$ 。顶板锚索采用 $\Phi 21.8\text{ mm}\times 7300\text{ mm}$ 钢绞线,呈3-2-3五花布置,间排距为 $1800\times 2000\text{ mm}$,锚索预紧力设置为 150 kN 。

2)巷帮支护。煤柱帮锚杆为 $\Phi 18\times 1800\text{ mm}$ 无纵筋螺纹钢,间排距 $900\times 1000\text{ mm}$ 。回采帮采用 $\Phi 27\times 2100\text{ mm}$ 玻璃钢锚杆,间排距 $900\times 1000\text{ mm}$ 。

3)底板支护。在距离巷道底板 600 mm 处布设 $\Phi 22\times 4300\text{ mm}$ 底板中空注浆锚索,注浆孔与巷道帮部成水平 15° 夹角,注浆锚索排距为 2000 mm 。注浆材料以亲泥性注浆材料为主,该材料以水灰比 $10:3$ 水泥为基础,通过复配高效分散剂、活性界面剂、微细填料和膨胀组分等外加剂,形成能够有效浸润、黏结并加固泥质软弱岩层的专用复合注浆材料。根据底板岩体的裂隙发展程度,建立巷道底板的地质力学模型,采用数值模拟方法模拟浆液在不同注浆压力下的扩散过程,观察浆液的扩散形态和范围,进

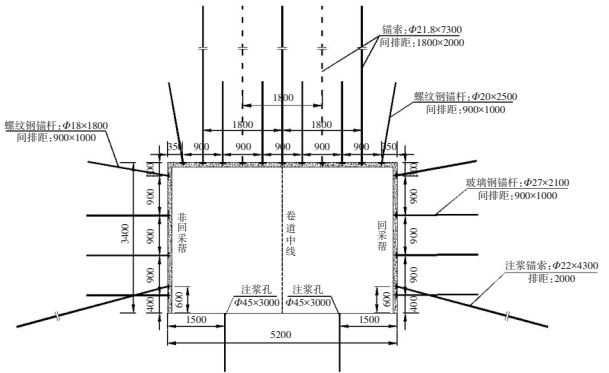


图8 全断面支护参数示意图(单位:mm)

Fig.8 Schematic diagram of the entire section support parameters

而得出初步结论,并通过现场试验确定注浆扩散半径为2.5~3.0 m,帮部注浆压力为1.0~1.5 MPa。注浆孔和两侧巷帮的距离为1500 mm,排距为2000 mm,孔径为45 mm,注浆孔深3000 mm。

4)全断面喷浆密闭。喷射混凝土型号为C20,喷射厚度为100 mm,初喷厚度为30 mm,复喷厚度为70 mm。

5 支护效果评价

5.1 数值计算评价

单根锚杆或锚索在其锚固区域内形成一定范围的支护应力场,合理控制支护构件的间距,各锚杆和锚索的支护应力场相互叠加,在围岩中形成一定范围的预应力挤压区(图9(a)、9(b)),该区域内岩体性质得到改善,支护单元形成了较好的承载结构,岩体的承载能力得到充分发挥。注浆加固和锚索支护提高了软弱结构面的力学属性,增强了层间抗滑移能力,层状底板由叠合梁结构转变为组合梁结构。支护构件深入稳固岩体,与围岩相互耦合形成顶-帮-底协同承载系统,巷道的整体稳定性大幅提高,围岩的破坏范围减小,防止了巷道底臌的出现。如图9(c)、9(d)所示,采用底板锚注支护后,层状底板的完整性提高,底板岩体形成协同承载体,底板破坏范围大幅度减小。

5.2 工程应用效果

采用顶帮底协同支护技术对3207工作面辅运巷道进行支护,并布置矿压测站对围岩控制效果,尤

其是底板变形进行观测,矿压测站如图10(a)所示。随工作面推进,巷表位移曲线如图10(b)所示,巷道围岩稳定性与工作面动态位置具有显著的关联性,工作面距离测点50~100 m处,采动应力场开始对围岩产生影响。工作面距离测点50 m范围内,巷道围岩受到采动应力的剧烈影响,围岩变形速率显著提高。工作面继续向前推进,采动应力的影响逐步降低,直至恢复稳定状态。巷道两侧底板的最大变形量分别为175 mm和95 mm,两侧巷帮累计变形量分别为162 mm和103 mm,巷中处顶底板累计收敛量为125 mm和145 mm。如图10(c)所示,顶板2 m处岩体的累计变形为48.5 mm,顶板5 m处岩体的累计变形为18.3 mm,巷道内部围岩处于较为稳定状态。锚杆锚索受力变化趋势如图10(d)所示,在监测周期内,锚杆锚索受力稳步增加,支护结构受载未出现急剧变化,也未失效归零,表明支护单元与围岩形成了统一承载结构。如图11所示,采用设计的支护方案,围岩与支护结构达到了良好的耦合状态,实现了顶帮底协同承载的目标,底板稳定性大幅提高,巷道底臌得到了有效控制。

6 结论

1)层状底板在工程扰动影响下逐层向下发生破坏,底板由浅入深依次形成强扰动区、弱扰动区和非扰动区。强扰动区岩体的变形是底板出现强烈底臌的主要原因,弱扰动区具备一定的承载性能,对层状底板的变形起到宏观调控的作用,非扰动区是围岩

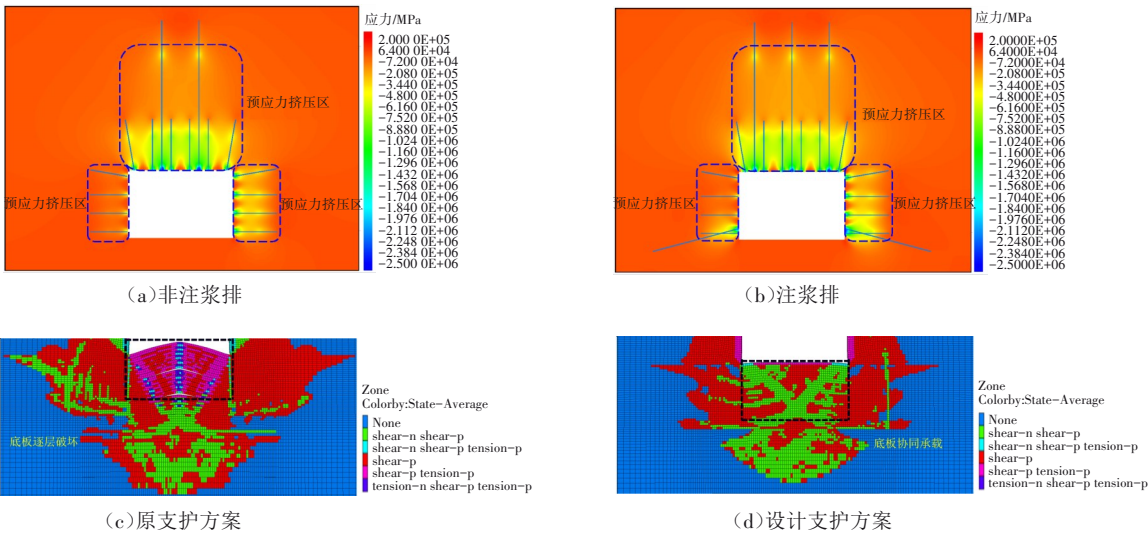


图9 支护应力场与底板控制效果

Fig.9 Support stress field and control effect of the floor

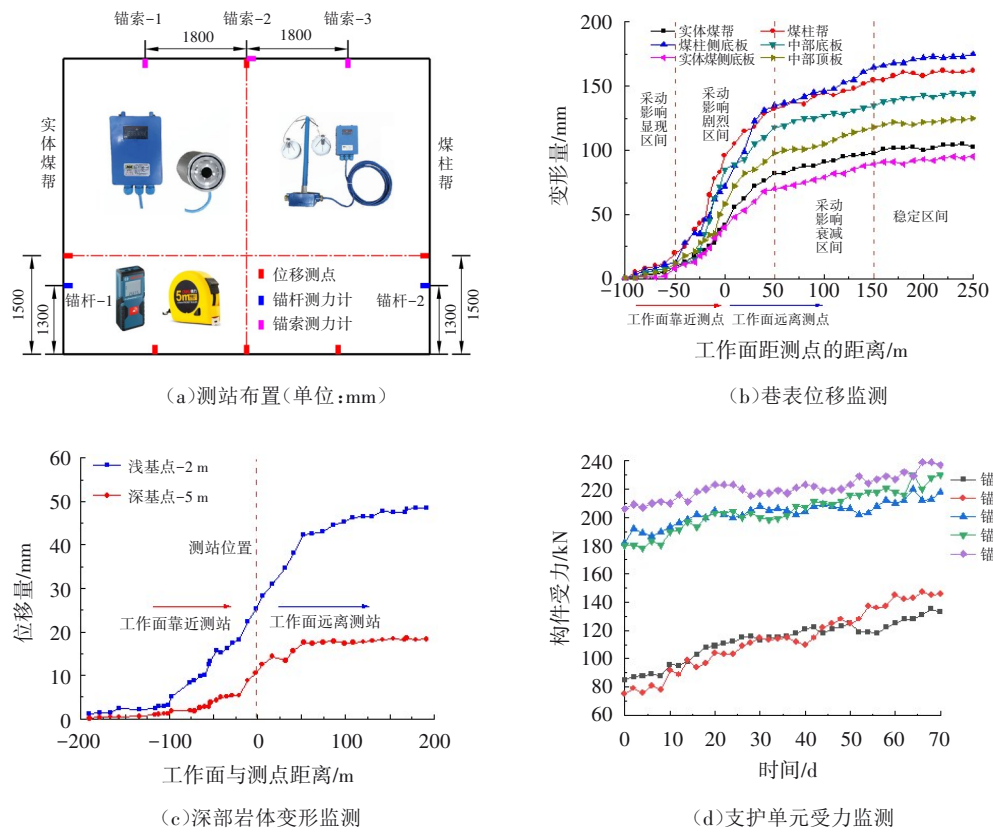


图10 围岩变形监测结果

Fig.10 Monitoring results of surrounding rock deformation

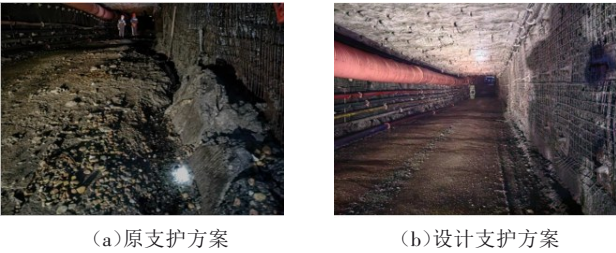


图11 围岩控制效果

Fig.11 Control effect of surrounding rock

承载的主要区域,层状底板的治理即实现强扰动区、弱扰动区和非扰动区的“三区”协同承载。

2)分层厚度对层状底板稳定性具有显著的调控作用,分层厚度由0.2 m增加到0.5 m,底板的完整性提高,承载能力增强,强扰动区的范围显著减小,底板的最大变形量由631.5 mm减小至253.2 mm,剧烈的底臃现象消失。

3)根据围岩协同控制技术,构建以“高强顶帮支护+全断面喷浆封闭+底板锚注”为核心的支护体系,数值计算和工程应用的结果表明,支护方案形成了顶-帮-底协同承载系统,有效抑制了底板大变形的出现。

参考文献:

[1] 宋刚. 富碱性水弱胶结软岩巷道围岩控制技术研究[J]. 煤炭工程, 2023, 55(8): 58-62.

Song G. Roadway surrounding rock control technology of weakly cemented soft rock with rich alkaline water [J]. Coal Engineering, 2023, 55(8): 58-62.

[2] 陈康,杨张杰,王福海,等. 富水弱胶结顶板巷道支护优化设计研究[J]. 煤炭工程, 2022, 54(11): 79-83.

Chen K, Yang Z J, Wang F H, et al. Optimal design of roadway support under water-rich weakly cemented roof [J]. Coal Engineering, 2022, 54(11): 79-83.

[3] 杨仁树,朱晔,李永亮,等. 层状岩体中巷道底板应力分布规律及损伤破坏特征[J]. 中国矿业大学学报, 2020, 49(4): 615-626, 645.

Yang R S, Zhu Y, Li Y L, et al. Stress distribution and damage characteristics of roadway floor in layered rock mass [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2020, 49(4): 615-626, 645.

[4] 杨仁树,朱晔,李永亮,等. 弱胶结软岩巷道层状底板底鼓机理及控制对策[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(3): 443-450.

- Yang R S, Zhu Y, Li Y L, et al. Floor heave mechanism and control measures of layered floor in weakly cemented soft rock roadway[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37(3): 443-450.
- [5] 文志杰,李秋菊,王皓,等. 深部巷道破坏灾变机理及应力梯度控制模型研究[J/OL]. 煤炭学报, 2025, 1-16. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2025.0196>.
- Wen Z J, Li Q J, Wang H, et al. Research on the catastrophic failure mechanism of deep roadways and stress gradient control models[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 1-16. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2025.0196>.
- [6] 肖同强,王泽源,刘发义,等. 深部强动压巷道底鼓控制机理及技术研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2024, 41(4): 666-676.
- Xiao T Q, Wang Z Y, Liu F Y, et al. Study on the mechanism and technology of floor heave control of deep roadway with strong mining pressure[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2024, 41(4): 666-676.
- [7] 刘泉声,刘学伟,黄兴,等. 深井软岩破碎巷道底鼓原因及处置技术研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(4): 566-571.
- Liu Q S, Liu X W, Huang X, et al. Research on the floor heave reasons and supporting measures of deep soft-fractured rock roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(4): 566-571.
- [8] 刘泉声,肖虎,卢兴利,等. 高地应力破碎软岩巷道底鼓特性及综合控制对策研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(6): 1703-1710.
- Liu Q S, Xiao H, Lu X L, et al. Research on floor heave characteristics of broken soft rocks with high geostress and its comprehensive control measures[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(6): 1703-1710.
- [9] 王宏伟,张登强,邓代新,等. 非静水压力条件下巷道围岩破碎区应力分布特征[J]. 煤炭学报, 2020, 45(11): 3717-3725.
- Wang H W, Zhang D Q, Deng D X, et al. Stress distribution characteristics of roadway surrounding rock damaged zone under non-hydrostatic pressure[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(11): 3717-3725.
- [10] 何满潮,张国锋,王桂莲,等. 深部煤巷底鼓控制机制及应用研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(增刊1): 2593-2598.
- He M C, Zhang G F, Wang G L, et al. Research on mechanism and application to floor heave control of deep gateway[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S1): 2593-2598.
- [11] 何满潮,武毅艺,高玉兵,等. 深部采矿岩石力学进展[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 75-99.
- He M C, Wu Y Y, Gao Y B, et al. Research progress of rock mechanics in deep mining[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 75-99.
- [12] 王卫军,范磊,赵志强,等. 基于塑性区控制的巷道围岩支护理论与技术研究进展[J]. 煤炭学报, 2024, 49(1): 320-336.
- Wang W J, Fan L, Zhao Z Q, et al. Research progress of support theory and technology of the roadway surrounding rock based on the plastic zone control[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(1): 320-336.
- [13] 王卫军,马谕杰,苏小伟,等. 基于塑性区恶性扩展规律的底板巷围岩变形机理分析及控制技术研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2025, 42(5): 983-997.
- Wang W J, Ma Y J, Su X W, et al. Deformation mechanism analysis and control technology research on surrounding rock of floor roadway based on the law of malignant expansion of plastic zone[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2025, 42(5): 983-997.
- [14] 康红普,姜鹏飞,冯彦军,等. 煤矿巷道围岩卸压技术及应用[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(6): 1-15.
- Kang H P, Jiang P F, Feng Y J, et al. Destressing technology for rock around coal mine roadway and its application[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(6): 1-15.
- [15] 孙晓明,苗沛阳,申付新,等. 沿不同应力状态下深井水平层状软岩巷道底鼓机理研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(6): 1099-1106.
- Sun X M, Miao P Y, Shen F X, et al. Study on floor heave mechanism of horizontal layered soft rock roadway in deep well under different stress states[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(6): 1099-1106.
- [16] 神文龙,柏建彪,于洋,等. 泥质底板动压巷道底鼓机理及控制技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2014, 42(3): 28-31.
- Shen W L, Bai J B, Yu Y, et al. Research on floor heave mechanism and control technology of muddy floor roadway under dynamic pressure[J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(3): 28-31.
- [17] 徐营,周辉,柏建彪,等. 沿空留巷底鼓特性与控制方法研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增刊2): 4235-4243.
- Xu Y, Zhou H, Bai J B, et al. Characteristics and control method of floor heave in gob-side entry retaining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(S2): 4235-4243.

(编辑 许军策)