

采动影响下软弱底板小煤柱巷道底鼓机理及协同控制技术

孙 锐^{1,2}

(1. 煤矿灾害防控全国重点实验室, 重庆 400037; 2. 中煤科工集团重庆研究院有限公司, 重庆 400037)

摘 要:为解决采动影响下软弱底板小煤柱巷道底鼓灾害对矿井安全高效生产的制约问题,采用理论分析、数值模拟与现场试验相结合的方法,研究软弱底板与采动扰动的耦合作用机制,揭示该类巷道底鼓机理并构建防治技术体系。研究表明:2103回风巷底鼓的核心诱因包括底板岩体破碎且抗压强度低、采动引起的小煤柱失稳,以及采空区上覆岩层重量向实体煤侧转移引发的应力集中。针对上述耦合诱因,提出“爆破卸压+小煤柱注浆加固+浇筑混凝土”协同控制技术,通过爆破卸压形成定向裂隙释放表层应力,以小煤柱注浆阻断应力传递并构建“煤柱-底板”协同承载结构,同时浇筑混凝土增强底板刚度抑制变形,三者协同实现底鼓精准控制。现场工业试验表明,治理区域底鼓量较未治理区域下降94.2%,验证了方案可靠性与可行性。研究结论为同类巷道底鼓防治提供理论依据与工程范例。

关键词:采动影响;软弱底板;小煤柱巷道;底鼓机理;爆破卸压;注浆加固

中图分类号:TD323

文献标志码:A

文章编号:1008-0562(2026)03-0266-10

Mechanism of subsidence-induced floor heave in small coal pillar roadways with weak floor under mining-induced disturbance and collaborative control technology

SUN Rui^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Coal Mine Disaster Prevention and Control, Chongqing 400037, China;

2. CCTEG Chongqing Research Institute, Chongqing 400037, China)

Abstract: To address floor heave issue in small coal pillar roadways with weak floor strata under mining-induced disturbances, which restricts the safe and efficient production of coal mines, this paper presents a combined research method of theoretical analysis, numerical simulation and field tests to investigate the coupling mechanism between weak floor strata and mining-induced disturbances, reveals the floor heave mechanism of such roadways and establishes a prevention and control technology system. The results indicate that the core causes of floor heave in the 2103 return airway include the low compressive strength of the floor rock mass, the instability of the small coal pillar caused by mining, and the stress concentration caused by the transfer of the weight of the overlying strata in the goaf to the solid coal side. To mitigate the above coupling disaster-causing factors, a “blasting pressure relief + small coal pillar grouting reinforcement + concrete pouring” coordinated control technology is proposed. The coordinated control technology achieves precise control of floor heave by forming directional fractures through blasting pressure relief to release surface stress, blocking stress transmission through grouting reinforcement of the small coal pillar and constructing a “coal pillar-floor” coordinated load-bearing structure, and enhancing the floor stiffness to suppress deformation through concrete pouring. Field

收稿日期: 2025-12-01 修回日期: 2026-01-07 接受日期: 2026-01-22 责任编辑: 张雯

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFC3009001); 国家自然科学基金项目(52274150); 天地科技股份有限公司科技创新创业资金专项项目(2023-2-TD-ZD001)

作者简介: 孙锐(1986-),男,湖北天门人,硕士,副研究员,主要从事矿山灾害力学方面的研究。E-mail: sr9085@163.com

industrial tests show that the floor heave at the treated area decreased by 94.2% compared with the untreated area, verifying the reliability of the scheme. The research conclusions provide theoretical basis and engineering examples for the prevention and control of floor heave in similar roadways.

Keywords: mining disturbance; weak floor strata; small coal pillar roadway; floor heave mechanism; blasting pressure relief; grouting reinforcement

0 引言

随着煤炭资源开采向深部延伸, 井下地质条件日趋复杂^[1], 采动影响下软弱底板小煤柱巷道底鼓现象尤为突出, 严重影响巷道稳定性、安全性和服务年限, 成为制约煤炭安全高效开采的关键问题^[2-3]。深入研究软弱底板小煤柱巷道底鼓机理, 探索有效协同控制技术, 对保障煤矿安全生产、提高资源回收率具有重要的现实意义和理论价值^[4-5]。

煤炭开采过程中, 巷道作为煤炭运输、人员通行和通风的重要通道, 其稳定性至关重要^[6]。小煤柱留设技术因能提高煤炭资源回收率、降低开采成本, 在煤矿开采中得到广泛应用^[7-8]。然而, 当巷道处于软弱底板条件且受相邻工作面采动影响时, 巷道围岩应力状态发生显著变化, 应力重新分布致使软弱底板承受更大压力, 极易引发底鼓^[9]。底鼓不仅会导致巷道断面缩小, 影响正常的生产运输和通风, 还可能引发顶板垮落、两帮片帮等系列次生灾害, 严重威胁井下作业人员的安全, 同时增加巷道维护成本和维护难度、降低煤矿开采效率^[10-11]。学者针对巷道底鼓问题开展了大量研究工作^[12], 在底鼓机理方面提出多种理论, 如遇水膨胀理论、应力扩容理论等, 从不同角度揭示了巷道底鼓的成因^[13-14]。随着研究的深入, 国内学者结合国内煤矿复杂的地质条件和开采环境, 指出采动应力、岩体结构、地下水作用等多种因素相互耦合是导致巷道底鼓的根本原因^[15-16]。在控制技术方面, 锚杆支护、注浆加固、底板卸压等传统支护技术在一定程度上缓解了巷道底鼓问题^[17-18], 但对于软弱底板小煤柱巷道, 单一支护技术往往难以达到理想的控制效果^[19]。近年来, 协同控制技术逐渐成为研究热点, 强调多种支护方式和控制手段的有机结合, 充分发挥各技术的优势, 以实现巷道围岩的有效控制^[20]。

尽管已有研究取得了诸多成果, 但针对采动影响下软弱底板小煤柱巷道底鼓这一复杂问题, 仍存在诸多有待深入探究之处^[21]。对采动应力与软弱底板相互作用机制的认识不够全面, 不同地质条件和开采参数下底鼓演化规律尚不清晰, 尚未形成差异化的协同控制方案, 协同控制技术的优

化配置和作用机理仍需进一步明确。作者以采动影响下软弱底板小煤柱巷道为研究对象, 综合运用理论分析、数值模拟、现场试验等手段, 深入剖析底鼓机理, 系统研究协同控制技术。通过揭示采动应力传递规律、软弱底板力学特性变化规律, 明确底鼓影响因素及演化规律。基于此, 提出适用于软弱底板小煤柱巷道的协同控制技术方案, 并通过现场工业性试验验证其有效性, 旨在为煤矿类似条件巷道的设计、支护和维护提供理论依据和技术支持, 推动煤炭行业安全高效开采技术的发展。

1 工程概况

某矿2103工作面位于北翼11盘区中部, 南侧紧邻2-1煤大巷, 北侧无相邻采动影响, 西侧500 m外及东侧为3-1煤层采空区(无显著扰动)。工作面开采对象为2-1煤层, 其回风巷沿该煤层底板掘进, 与西侧已回采的3-1煤层采空区之间留设6 m宽小煤柱。水平标高为658.4~677.4 m, 煤层厚度3.68~5.23 m, 倾角为0°~4°, 属近水平煤层, 煤层起伏较小。设计断面为三心拱, 设计尺寸为5.8 m×3.6 m(净宽×净高), 施工时按偏中线掘进。底板力学特性测试表明, 底板直接底为砂质泥岩, 其饱和单轴抗压强度为3.2~5.8 MPa, 软化系数为0.42~0.55, 属于软弱底板。X射线衍射显示黏土矿物(蒙脱石+伊利石)质量分数为18.7%, 遇水体积膨胀率为3.5%~5.2%, 存在弱膨胀性。回风巷实地调查表明, 底鼓呈现出非对称变化特征: 实体煤侧巷道地面裂缝显著(宽窄不一、部分交错延伸), 底鼓变形明显且分布范围广, 局部伴随破碎错动, 见图1。



图1 现场底鼓变形特征

Fig.1 deformation characteristics of floor heave roadway

由图 1 可知, 实体煤侧巷道地面出现明显裂缝, 裂缝宽窄不一, 部分区域裂缝较宽且延伸较长, 呈现出不规则走向, 有的裂缝相互交错。小煤柱一侧裂缝相对较少且不明显。实体煤侧底鼓明显, 部分区域底鼓幅度较大, 地面部分出现破碎、错动。小煤柱一侧地面相对平整, 隆起幅度小。实体煤侧底鼓现象分布范围较广, 沿巷道纵向有较长距离出现该状况。小煤柱一侧仅偶尔有轻微底鼓迹象, 范围有限。

2 巷道底板破坏力学分析

掘巷后巷道底板两侧(实体煤与小煤柱)垂直应力分布呈现“一侧集中、一侧松弛”的非对称特征, 本质是煤柱承载能力差异导致的应力传递路径分化。这种非对称性随煤柱宽度减小、随软弱底板软化程度强化及采动次数增加而加剧, 是小煤柱巷道底鼓破坏的关键诱因之一^[21]。实体煤完整的岩体结构与小煤柱相对薄弱的承载结构存在显著差异, 导致二者对底板的压力传递效率不同, 呈现出实体煤侧应力集中、小煤柱侧应力松弛的独立分布特征。巷道底板两侧垂直应力分布见图 2, q_1 、 q_4 分别为巷道两侧实体煤与小煤柱侧的垂直载荷集度; q_2 、 q_3 为底板岩层受采动影响后的等效载荷; $q_{\max}$ 为巷道底板受到的最大均布载荷强度; $Q_{\max}$ 为巷道底板受到的最大集中力。

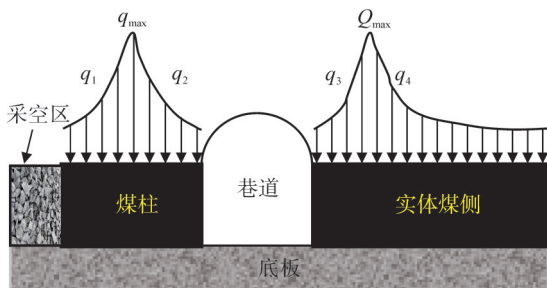


图 2 巷道底板两侧垂直应力分布

Fig.2 vertical stress distribution on both sides of the roadway floor

2103 工作面采动时, 小煤柱巷道底板变形呈现“应力集中显著、破坏分异明显、时间效应突出”的规律, 其核心机制是采动应力通过小煤柱与实体煤的非对称传递, 引发软弱底板的剪切-挤压破坏。采用弹性地基梁理论和基床系数法对小煤柱巷道底鼓机理进行力学分析, 见图 3。

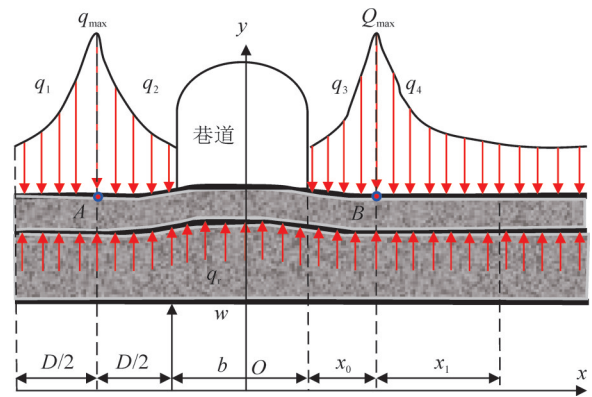


图 3 层状底板弹性地基梁模型

Fig.3 elastic foundation beam model of layered floor

假定软弱层状岩体中底板任一点挠度 w 和其承受的压力 P 成正比^[22], 即

$$P = kw, \quad (1)$$

式中, k 为地基反力系数。

设底板是长为 L 、截面为 $b \times h_1$ (宽 $\times$ 高) 的底板梁, 作用在厚度为 H 的弹性底板, 弹性底板下为刚性基层。对系统最小势能取变分, 可得梁的挠曲微分方程为

$$E_b I_b \frac{d^4 w}{dx^4} - 2t \frac{d^2 w}{dx^2} + kw = 0, \quad (2)$$

式中: E_b 为梁的弹性模量; I_b 为梁的惯性矩; t 为底板梁与弹性地基的耦合作用系数; x 为沿巷道轴线的水平坐标。

地基刚度参数计算式为

$$2t = \int_0^H \frac{G_s^*}{1 + 0.75v_s} \varphi^2 dz, \quad (3)$$

$$k = \int_0^H \frac{2G_s^* b(1 - v_s)}{1 + 0.75v_s} \left(\frac{d\varphi}{dz} \right)^2 dz, \quad (4)$$

式 (3)、式 (4) 中: G_s^* 为地基刚度参数; v_s 为地基泊松比; b 为底板梁宽度; z 为底板表面到计算点的深度; φ 为底板岩层的内摩擦角。

地基特性参数与剪切模量的关系为

$$G_s^* = G_s(1 + 0.75v_s), \quad (5)$$

$$\varphi(z) = \frac{\sinh[\gamma(1 - z/h)]}{\sin(\gamma h)}, \quad (6)$$

$$\left(\frac{\gamma}{H} \right)^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\frac{dw}{dx} \right)^2 dx / \left(2 \int_{-\infty}^{+\infty} w^2 dx \right), \quad (7)$$

式 (5) ~ 式 (7) 中: γ 为地基特性参数; G_s 为深度 z 处岩体的剪切模量; h 为底板岩层计算点到底板表面的深度。

由式(6)、式(7)可得

$$k = \frac{G_s^*(1-\nu_s)}{(1+0.75\nu_s)(1-2\nu_s)} \frac{b}{H} \times \frac{\gamma[\sin(\gamma h)\cos(\gamma h) + \gamma]}{\sin^2(\gamma h)} \quad (8)$$

参数 γ 的拟合方程为

$$\gamma = k_1 \left(\frac{H}{L} \right) k_2 \left(\frac{L}{D} \right) k_3 \left(\frac{E_s}{G_s^*} \right) k_4, \quad (9)$$

式中: k_1 、 k_2 、 k_3 、 k_4 为拟合系数; D 为底板梁所受载荷在水平方向上的影响范围尺寸; E_s 为地基压缩模量。

应用弹性地基梁理论, 得出表面任意点 (x, y) 处竖向位移为

$$d(x, y) = \frac{(1-\nu_0^2)q}{\pi E_0 r}, \quad (10)$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad (11)$$

式(10)、式(11)中: ν_0 为软弱底板泊松比; q 为软弱底板所受载荷; E_0 指软弱底板压缩模量; r 为软弱底板任意一点到集中载荷作用点(坐标原点)的距离。

在巷道中线处有

$$w_{x=b/2} = \int_{-D}^{-\frac{D}{2}} \frac{(1-\nu_0^2)q_1}{\pi E_0(b/2-x)} dx + \int_{-\frac{D}{2}}^0 \frac{(1-\nu_0^2)q_2}{\pi E_0(b/2-x)} dx + \int_b^{b+x_0} \frac{(1-\nu_0^2)q_3}{\pi E_0(b/2-x)} dx + \int_{b+x_0}^{b+x_0+x_1} \frac{(1-\nu_0^2)q_4}{\pi E_0(b/2-x)} dx \quad (12)$$

故距离巷道底板 $b/2$ 处位移为

$$d_{x=b/2} = \frac{1-\nu_0^2}{\pi E_0} \left\{ [\ln(b/2+D) - \ln(b/2)] q_{\max} + [\ln(b/2+x_0+x_1) - \ln(b/2)] Q_{\max} \right\} \quad (13)$$

距离巷道底板 $b/4$ 处位移为

$$d_{x=b/4} = \frac{(1-\nu_0^2)}{\pi E_0} \left\{ [\ln(b/4+D) - \ln(b/4)] q_{\max} + [\ln(b/4+x_0+x_1) - \ln(b/4)] Q_{\max} \right\} \quad (14)$$

巷道底板任意一点的位移为

$$d(x) = \frac{(1-\nu_0^2)}{\pi E_0} \left\{ [\ln(x+D) - \ln x] q_{\max} + [\ln(x+x_0+x_1) - \ln x] Q_{\max} \right\} \quad (15)$$

地基反力为

$$q(x) = \frac{G_s^*(1-\nu_s)}{(1+0.75\nu_s)(1-2\nu_s)} \frac{b}{H} \times \frac{\gamma[\sin(\gamma h)\cos(\gamma h) + \gamma]}{(\sin\gamma h)^2} \frac{(1-\nu_0^2)}{\pi E_0} \times \left\{ [\ln(x+D) - \ln x] q_{\max} + [\ln(x+x_0+x_1) - \ln x] Q_{\max} \right\} \quad (16)$$

结合2103回风巷底板泥岩实测参数($\mu_0=0.32$ 、 $E_0=3.5$ GPa), 计算得出采动前底板竖向位移为8~12 mm, 地基反力系数 k 为12~15 MN/m³; 采动后底板竖向位移增至180~220 mm, k 降至5~8 MN/m³。表明采动应力对底板破坏作用明显。

A 、 B 处出现最大剪应力, 计算得到 A 、 B 间的剪应力为

$$F_s = (q - q_r)a, \quad (17)$$

式中: q_r 为底板自重等效均布载荷; a 为小煤柱宽度。

A 、 B 间任意点弯矩为

$$M = \int_{-D}^{-\frac{D}{2}} q_1(b/2-x) dx + \int_{-\frac{D}{2}}^0 q_2(b/2-x) dx - \int_b^{b+x_0} q_3(b/2-x) dx + \int_{b+x_0}^{b+x_0+x_1} q_4(b/2-x) dx - \int_{-D}^{b+x_0+x_1} q_r(b/2-x) dx \quad (18)$$

将实测参数代入式(17)、式(18)得出截面切应力、正应力分别为

$$\tau = \frac{F_s S_z}{I_z \Delta b}, \quad (19)$$

$$\sigma = My/I_z, \quad (20)$$

式(19)、式(20)中: S_z 为中性轴静矩; I_z 为中性轴惯性矩; Δb 为截面宽度。

将实测参数代入式(19)、式(20)可得 τ 为5.22 MPa, σ 为2.35 MPa。试验所得软弱底板样品许用抗剪强度 $[\tau]$ 为4.98 MPa, 许用抗拉强度 $[\sigma]$ 为2.48 MPa。此时, $\tau \geq [\tau]$, $\sigma \geq [\sigma]$ 。根据钱鸣高等^[23]的研究, 当 $\tau \geq [\tau]$ 时, 小煤柱巷道软弱底板发生剪切断裂, 一般发生在巷道底角下部; 当 $\sigma \geq [\sigma]$ 时, 小煤柱巷道软弱底板发生拉伸断裂, 一般发生在巷道中央偏向煤柱位置。故2103回风巷底鼓发生在靠近实体煤一侧。这与实地调查结果一致, 验证了理论分析的正确性。

3 回采期间巷道应力分布规律

3.1 模型构建

根据2103回风巷现场实际地质条件, 结合岩

层物理力学参数实测结果,采用FLAC^{3D}构建数值模型,重点分析2103回风巷回采期间岩层应力演化特征。模型尺寸(长×宽×高)设为910 m(走向)×1 400 m(倾向)×236 m(垂深),其中2-1煤层厚度按实测值3.68~5.23 m建模,6 m宽小煤柱、3-1

煤层采空区等关键结构均按实际空间位置还原。为模拟上覆岩层自重,按等效岩柱高度(480 m,岩体容重为25 kN/m³)对模型上部施加12 MPa垂直均布载荷,水平地应力侧压系数取0.8(与现场地应力测试结果一致)。物理力学参数见表1。

表1 物理力学参数
Tab.1 physical and mechanical parameters

岩层	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa
关键层砂岩	2 600	15.0	0.25	3.5	35	2.8
直接顶	2 450	4.2	0.30	1.0	25	1.1
2-1 煤	1 350	2.8	0.33	1.2	28	0.8
直接底	2 500	4.2	0.30	0.8	22	0.5

2103工作面上部已经形成一个老采空区(上一采空区),该区域已完成回采,形成大面积采空。在老采空区与2103工作面之间,留设了一条约6 m宽的小煤柱,用于分隔上下两个采空区并保证围岩稳定。2103工作面采用沿空掘巷方式布置,工作面两侧巷道已在底部或侧部预先开挖。基于上述工程背景,分析不同阶段条件下工作面开切眼及推进期间不同超前距离处巷道围岩垂直应力分布。综放工作面转采围岩运动受采空区形状及工作面侧向约束条件等因素的影响,同一工作面不同区域或不同开采阶段的应力分布规律各异。

3.2 回采期间垂直应力分布规律

巷道开挖完成后,工作面开切眼、工作面推进后采场垂直应力分布见图4。

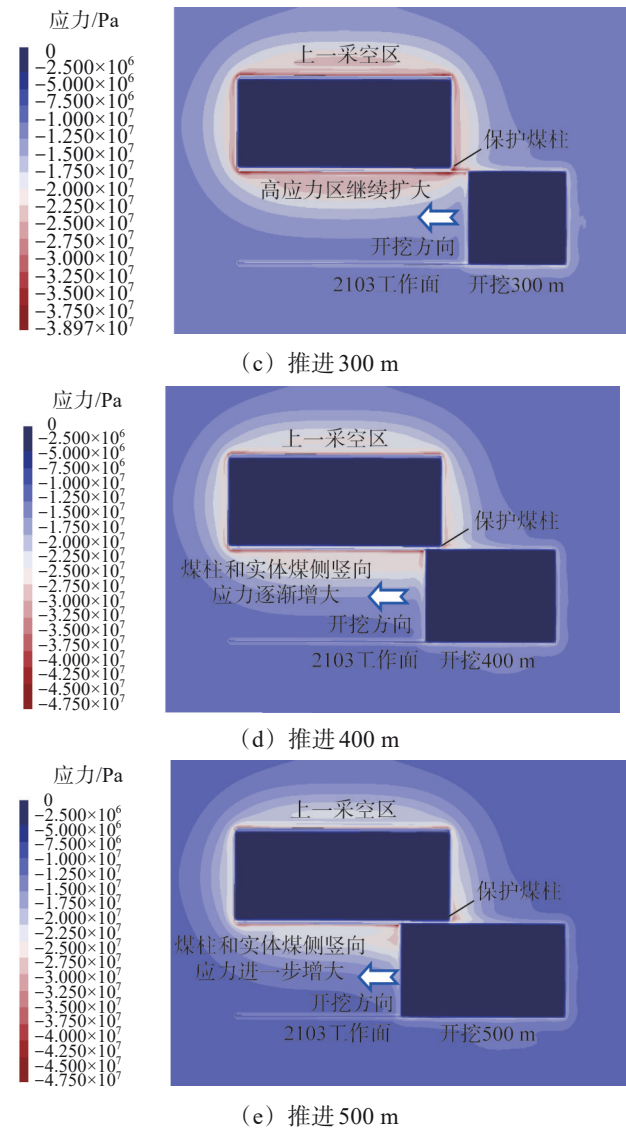
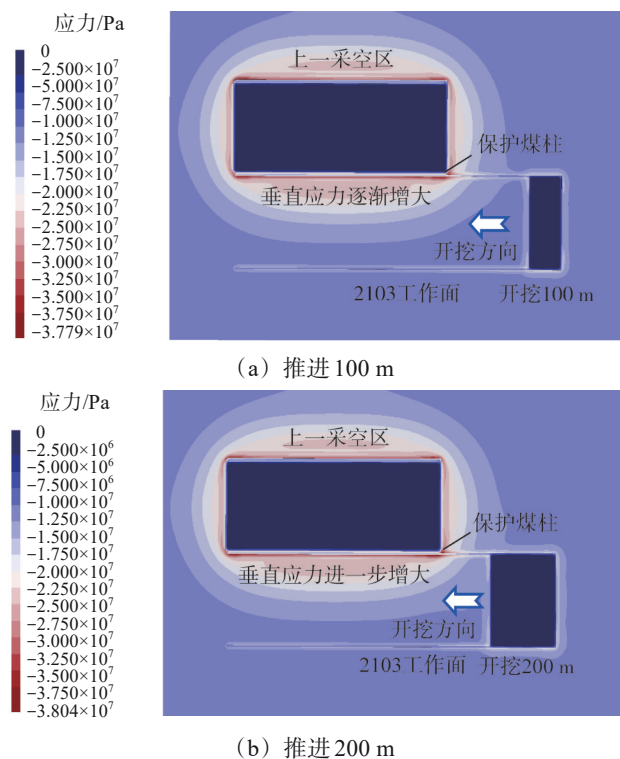


图4 工作面推进后采场垂直应力分布

Fig.4 vertical stress distribution in stope after working face advancement

由图4可知,当工作面推进至100 m时,新采空区进一步扩大,与老采空区共同对煤柱和工作面前方煤体施加更大载荷。高应力带在煤柱及工

作面前方呈现更深的红色及白色区域,表明垂直应力进一步增大。由于煤柱宽度为6 m,在承载两侧采空区及上覆岩层载荷时,极易出现超强度或塑性破坏风险。当工作面推进至200 m时,采空区规模达到阶段性开采的极限,高应力区在煤柱及工作面前方的分布更加显著。此时,长期高应力集中作用导致6 m小煤柱发生严重的塑性破碎或塑性流动,实体煤一侧应力也不断增加。当工作面推进至300 m时,与推进至200 m时相比,采空区继续向前扩展,形成更大范围应力区。当工作面推进到400 m时,高应力区在煤柱和实体煤侧进一步强化。工作面推进至500 m时,采空区规模再度扩大,煤柱及实体煤侧垂直应力值进一步升高。老采空区与新采空区之间的接触距离增大,煤柱成为“桥梁式”承载点,压力更集中。此阶段煤柱内部将出现塑性区或裂隙扩展,加速破碎及失稳。煤柱一旦失稳,将引发老采空区与新采空区贯通,对巷道和顶板安全构成严重威胁,实体煤侧在挤压作用下应力分量持续增大。

3.3 小煤柱及巷道变形特征量化分析

结合数值模拟结果,得出不同采动推进距离下小煤柱与巷道变形关键参数,见表2,可明确二者演化规律与底鼓的关联。由表2可知,随着采动推进距离增加,小煤柱塑性区从表层向内部逐步

扩展,当推进至500 m时塑性区贯通全煤柱(宽度为6 m),内部裂隙网络完全形成,承载能力骤降,最大位移为258 mm。对应巷道底鼓量呈阶梯式增长,且实体煤侧底鼓量始终为小煤柱侧的4~5倍,与现场调查的“实体煤侧裂缝密集、隆起明显,小煤柱侧变形轻微”现象完全一致,进一步验证小煤柱塑性劣化是巷道底鼓加剧的核心诱因。同时,采动前小煤柱应力集中系数仅为1.2,应力均匀分布于煤柱全宽。采动推进后,老采空区与新采空区形成“双采空区夹煤柱”格局,上覆岩层重量向小煤柱与实体煤侧转移,使小煤柱应力集中系数逐步攀升至3.1,且高应力区始终集中于小煤柱靠近实体煤侧1/3区域,形成“窄条带高应力核”,最大应力为37.2 MPa,远超小煤柱黏聚力(1.2 MPa)及内摩擦角 28° 对应的极限承载应力(25 MPa)。小煤柱“窄条带高应力核”通过煤柱-底板接触界面,将集中应力垂直传递至巷道底板,使实体煤侧底板垂直应力由初始12 MPa增至22 MPa,超过直接底砂质泥岩抗压强度。结合力学分析可知, τ 为5.22 MPa,大于 $[\tau]$ (4.98 MPa),高应力引发底板岩体剪切-挤压破坏,内部裂隙持续扩展并向上鼓起,形成“采动应力→小煤柱应力集中→底板高应力→岩体破坏→底鼓”的完整致灾链条,为下一步底鼓防治措施的制定提供了依据。

表2 不同采动推进距离下小煤柱与巷道变形关键参数

Tab.2 key deformation parameters of small coal pillars and roadways under different mining advance distances					
采动推进距离/m	小煤柱塑性区深度/m	小煤柱最大位移/mm	实体煤侧底鼓量/mm	小煤柱侧底鼓量/mm	小煤柱应力集中系数
100	0.8	48	120	35	1.6
200	1.2	85	250	68	2.1
300	1.5	122	380	95	2.3
400	2.8	186	520	130	2.7
500	6.0	258	750	180	3.1

4 底鼓治理控制技术

4.1 2103回风巷底鼓核心机理

综合理论分析、数值模拟及现场调查结果,2103回风巷底鼓的诱发机制可归纳为“应力-岩性-采动”三者耦合作用,具体表现为以下四个方面。

(1) 实体煤侧应力集中主导变形

开采过程中,采空区上覆岩层重量(等效为约12 MPa的载荷)向实体煤侧转移,形成“窄条带

高应力核”。数值模拟显示,采动推进至500 m时实体煤侧垂直应力达22 MPa,远超直接底砂质泥岩抗压强度(3.2~5.8 MPa);同时水平应力分量显著增大,在巷道底板产生挤压效应,导致岩层向临空面鼓起,引发剪切破坏并形成裂隙网络,进一步削弱底板整体强度。

(2) 采动扰动加剧小煤柱失稳

6 m宽小煤柱受老采空区与新采空区“双采空区夹煤柱”格局影响,应力集中系数从采动前1.2攀升至3.1,最大应力为37.2 MPa(远超2-1煤层

极限承载应力 25 MPa)。随推进距离增加,小煤柱塑性区从 0.2 m 扩展至全煤柱(6 m),内部裂隙网络贯通,承载能力骤降,无法有效传递应力,导致更多载荷向底板转移,加剧底鼓发展。

(3) 软弱底板岩性劣化放大变形

底板直接底为砂质泥岩,饱和单轴抗压强度仅为 3.2~5.8 MPa,软化系数为 0.42~0.55,且黏土矿物(蒙脱石+伊利石)占比为 18.7%,遇水体积膨胀率为 3.5%~5.2%。采动扰动使底板岩体破碎,地下水渗入后引发软化、膨胀,力学性能进一步劣化,基床系数从采动前的 12~15 MN/m³降至 5~8 MN/m³,无法抵抗上部应力作用,易发生塑性流动变形。

(4) 应力传递路径失衡加速破坏

掘巷后底板两侧呈实体煤侧应力集中、小煤柱侧应力松弛的非对称分布特征(见图 2),实体煤侧底板应力(18~22 MPa)为小煤柱侧(5~8 MPa)的 4~5 倍。这种应力分布失衡导致底板变形分异,现场调查显示实体煤侧底鼓量(750 mm)为小煤柱侧(180 mm)的 4.2 倍,且裂缝密集、隆起明显,验证了应力传递路径失衡对底鼓的加速作用。

4.2 协同控制技术

针对现场多次维护仍出现底鼓严重的问题,提出“爆破卸压+小煤柱注浆加固+浇筑混凝土”协同控制技术。爆破卸压主要通过实体煤侧底角处布置爆破孔,利用炸药爆炸产生的冲击波和应力波在岩体中形成定向裂隙网络。裂隙削弱岩体完整性,使原本集中的应力通过裂隙释放或向深处转移,降低底板表层应力水平。爆破后,底板附近的高应力状态转变为低应力或均匀应力状

态,打破原有应力平衡,抑制因应力集中引发的软弱底板底鼓或滑移^[24-25]。小煤柱注浆加固通过浆液填充煤柱原生裂隙与采动诱发裂隙,形成连续完整的“浆液-煤体”复合承载结构。一方面利用复合结构更高的侧向刚度提升对软弱底板的侧向约束能力,限制底板水平位移与弯曲变形。另一方面,复合结构的完整性增强(注浆后煤柱内部裂隙被浆液胶结,整体连续性大幅提升),使煤柱具备更优的应力传递效率,可将原本向底板分散传递的采动应力集中导向深部稳定岩体。其力学本质是通过提高煤柱岩体弹性模量与抗剪强度,改变应力传递路径的分配比例,即减少垂直应力向软弱底板的分流量,宏观上表现为阻断效应。浇筑混凝土主要增强底板刚度,抑制底鼓扩展,体现在以下三个方面。一是混凝土层作为底板的刚性外壳,直接限制岩层底鼓变形。二是当底板岩体因应力作用产生微小膨胀时,混凝土层通过自身刚度提供反向约束力,抑制岩层的垂直位移,并使应力均匀化。在软弱底板受力不均时,混凝土层可将集中应力均匀传导至深部岩体,避免应力集中导致底板开裂。三是混凝土的流动性使其能够渗入底板岩体的原生裂隙或爆破产生的人工裂隙中,形成混凝土-岩体咬合结构,阻止裂隙进一步扩展和贯通,从而抑制底鼓的渐进发展。需要注意的是,尽管浇筑混凝土可增强底板刚度,但随工作面推进及围岩蠕变,仍需通过现场监测(如应力传感器实时监测底板垂直应力变化)动态评估应力重新分布风险,必要时可通过二次注浆补充加固裂隙发育区域,进一步保障应力传递路径的稳定性。三者协同作用可实现应力传递路径的重构,有效抑制底鼓。技术原理见图 5。

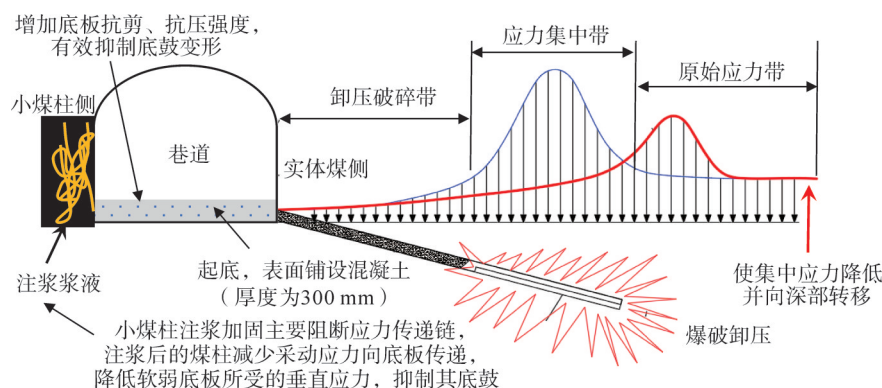


图 5 “爆破卸压+小煤柱注浆加固+浇筑混凝土”控制技术原理

Fig.5 schematic of the control technology for “blasting pressure relief + small coal column grouting reinforcement + concrete pouring”

4.3 技术工艺

根据现场底鼓严重区域, 制定“爆破卸压+小煤柱注浆加固+浇筑混凝土”控制技术工艺如下。

(1) 钻孔布置与施工

在巷道底板实体煤侧底角及中部呈“三花眼”多排布置, 钻孔直径为42 mm, 孔深为4.5 m, 孔距为1.8 m, 排距为1.4 m; 钻孔向底板方向倾斜35°, 与实体煤侧煤壁夹角为60°, 避免穿透小煤柱或采空区。采用湿式钻孔工艺, 钻孔施工后清理孔内岩粉, 确保装药顺畅, 防止粉尘超限。

(2) 装药与爆破

根据钻孔布置参数与砂质泥岩力学特性, 岩体爆破卸压药量为

$$Q=KLS,$$

式中: K 为应力修正系数, 结合应力集中系数取1.2; L 为钻孔有效长度, 取4.0 m; S 为岩体抗力系数, 根据直接底砂质泥岩抗压强度3.2~5.8 MPa, 取0.075 kg/m。

计算得到单孔装药量为0.36 kg, 现场采用乳化炸药分段装药(每段0.12 kg, 间隔0.5 m), 总装药量控制在每孔300~350 g, 既保证通过冲击波形成定向裂隙网络(释放集中应力至15 MPa以下), 又避免药量过大导致底板岩体过度破碎。

(3) 加固

小煤柱注浆加固采用“ $\Phi 42$ mm 钻孔+ $\Phi 32$ mm 注浆管+分级密封”结构。钻孔穿透小煤柱主要裂隙区(孔深4 m)后, 向孔内植入带止浆塞的注浆管(注浆管前端2 m范围开设 $\Phi 8$ mm 注浆孔, 间距300 mm)。孔口段(巷道侧0.5 m范围)采用“聚氨酯封孔剂+膨胀水泥”双层密封。先注入聚氨酯封孔剂填充钻孔与注浆管间隙, 待其固化后, 在孔口外侧浇筑膨胀水泥, 形成深度0.3 m的刚性密封段, 阻断浆液从孔口泄漏。

(4) 底板处理与钢筋布置

爆破后清理底板浮矸、碎岩, 采用激光找平仪控制平整度, 凹凸误差不超过50 mm; 若底板存在涌水, 需先施工排水盲沟(沟宽为200 mm, 深度为300 mm, 填充碎石)。钢筋网须延伸至巷道两帮墙脚, 与帮部锚杆(索)通过焊接或绑扎连接, 形成整体支护结构; 底角锚索与钢筋网交叉处采用“U”形卡固定。

(5) 模板支护与混凝土浇筑

模板支护采用钢模板或定型化塑料模板, 高度与混凝土设计厚度一致, 模板支撑间距不超过1.0 m, 确保浇筑时不变形。下料方式从巷道一端向另一端分层浇筑, 每层厚度不超过300 mm, 采用插入式振捣器确保密实; 若需分段浇筑, 预留阶梯形施工缝, 下次浇筑前清理浮浆并铺设20~30 mm 厚同强度等级水泥砂浆。浇筑完成后12 h内覆盖薄膜或洒水养护, 养护时间不小于7 d, 环境温度低于5 °C时需要采取保温措施。

4.4 现场效果分析

对治理前后典型巷道底鼓量进行对比(见图6)。未治理处底鼓量随时间持续增长, 100 d左右达到977 mm, 仍有上涨趋势, 表明围岩变形严重且未得到有效抑制。治理后底鼓量始终保持在极低水平, 100 d后稳定在57 mm, 较未治理处下降了94.2%。结果表明, 治理措施有效控制了底鼓变形, 抑制了围岩底鼓发展, 显著提升了围岩稳定性。

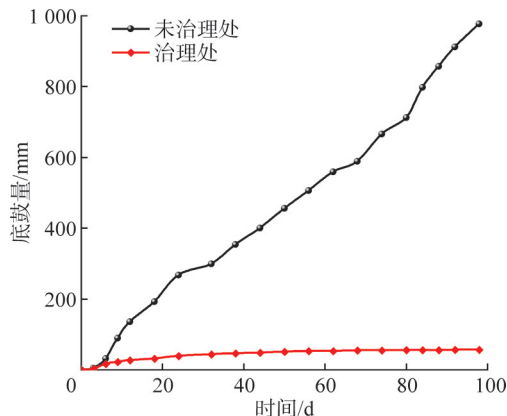


图6 采动影响下软弱底板小煤柱巷道底鼓控制前后对比
Fig.6 comparison of floor heave control effects before and after treatment in a small-pillar roadway with a weak floor under mining influence

5 结论

(1) 采用现场调查、理论分析及数值模拟等手段, 明确了小煤柱巷道底鼓的核心诱因: 底板岩性软弱破碎, 抗压强度低, 受采动影响煤柱发生失稳, 以及开采过程中采空区上方岩层重量向实体煤侧转移使实体煤侧应力集中。

(2) 提出“爆破卸压+小煤柱注浆加固+浇筑混凝土”协同控制技术。利用爆炸产生的冲击波

和应力波,在岩体中形成定向裂隙网络,使原本集中应力通过裂隙释放或向远离巷道区域转移,降低底板表层应力水平。小煤柱注浆加固阻断应力传递链,降低软弱底板所受的垂直应力。加固底板关联区域,同步提高底板岩体强度,形成“煤柱-底板”协同承载结构,抑制底鼓。浇筑混凝土增强底板刚度,抑制变形扩展。三者协同作用抑制底鼓发展。

(3) 现场应用表明,治理后巷道底鼓下降94.2%,该协同控制技术能有效解决采动影响下软弱底板小煤柱巷道的底鼓难题。

参考文献(References):

- [1] 康红普,徐刚,王彪,等.我国煤炭开采与岩层控制技术发展40a及展望[J].煤矿开采,2019,1(2):1-33.
KANG Hongpu, XU Gang, BIAOMOU, et al. Forty years development and prospects of underground coal mining and strata control technologies in China[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2019, 1(2): 1-33.
- [2] 郭飞,吴少康,唐东旭,等.小煤柱工作面巷道变形机理与治理技术研究综述[J].矿产保护与利用,2025,45(2):53-63.
GUO Fei, WU Shaokang, TANG Dongxu, et al. Review on deformation mechanism and control technology of small coal pillar working face roadway[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2025, 45(2):53-63.
- [3] 孟祥军,赵鹏翔,王绪友,等.倾斜厚煤层沿空掘巷窄煤柱留设尺寸及围岩控制技术研究[J].西安科技大学学报,2022,42(3):413-422.
MENG Xiangjun, ZHAO Pengxiang, WANG Xuyou, et al. Reasonable width of narrow coal pillars and control technology of surrounding rock of gob-side entry in inclined thick coal seam [J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2022,42(3): 413-422.
- [4] 毕慧杰,莫云龙.顺序开采工作面小煤柱巷道布置方法研究[J].煤矿安全,2024,55(7):145-153.
BI Huijie, MO Yunlong. Research on layout method of small coal pillar roadways in sequential mining faces [J]. Safety in Coal Mines, 2024, 55(7): 145-153.
- [5] 韩军,郭宝龙,贾冬旭,等.冲击地压的两种破坏类型及其机制[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2024,43(5):524-533.
HAN Jun, GUO Baolong, JIA Dongxu, et al. Two failure types and its mechanism of coal bump[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science),2024,43(5):524-533.
- [6] 李汉璞,张百胜,郭俊庆,等.两次采动影响下小煤柱巷道切顶卸压围岩控制技术[J].矿业安全与环保,2024,51(2):90-97.
LI Hanpu, ZHANG Baisheng, GUO Junqing, et al. Surrounding rock control technology of roof cutting for pressure relief in small coal pillar roadway under secondary mining [J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2024, 51(2): 90-97.
- [7] ZHANG J G, YANG W, LIN B Q, et al. Strata movement and stress evolution when mining two overlapping panels affected by hard stratum[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2019, 29(5):691-699.
- [8] 刘鹏,魏金凯.厚煤层沿空掘巷下小煤柱宽度及切顶卸压控制研究[J].工矿自动化,2025,51(10):151-158.
LIU Peng, WEI Jinkai. Width of small coal pillars and control of pressure relief by roof cutting in roadway excavation along goaf under thick coal seam[J]. Journal of Mine Automation,2025,51(10): 151-158.
- [9] 张道兵,尹华东,胡阿平,等.高地应力下深部硐室底鼓破坏围岩稳定性分析[J].防灾减灾工程学报,2024,44(3):660-669.
ZHANG Daobing, YIN Huadong, HU Aping, et al. Analysis on the stability of surrounding rock damaged by the floor drum of deep underground chamber under high in-situ stress[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2024, 44(3): 660-669.
- [10] 吴少康,张俊文,徐佑林,等.煤层群采动下围岩应力演化规律及协同控制技术研究[J].煤炭科学技术,2024,52(3):24-37.
WU Shaokang, ZHANG Junwen, XU Youlin, et al. Study on the stress evolution law of surrounding rock and cooperative control technology in coal seam group mining[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(3):24-37.
- [11] 徐佑林,吴少康,周波,等.强动压破碎软岩巷道再造多重承载结构全空间协同支护技术研究[J].岩石力学与工程学报,2025,44(7):1720-1735.
XU Youlin, WU Shaokang, ZHOU Bo, et al. Full-space collaborative support technology for reconstructing multi-bearing structures in crushed soft rock roadways under strong dynamic pressure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2025, 44(7): 1720-1735.
- [12] 丁维波,高卫卫,肖琦,等.特厚煤层回采巷道底鼓力学特性及控制研究[J].中国煤炭,2024,50(10):75-83.
DING Weibo, GAO Weiwei, XIAO Qi, et al. Study on mechanical properties and control of floor heave in mining roadway of extra-thick coal seam [J]. China Coal, 2024, 50(10): 75-83.
- [13] 李可,余伟健,廖泽,等.不同应力加载速率下深埋泥岩力学特性与扩容特征试验研究[J].煤炭学报,2023,48(9):3360-3371.
LI Ke, YU Weijian, LIAO Ze, et al. A laboratory-testing-based study on mechanical properties and dilatancy characteristics of deeply buried mudstone under different stress loading rates[J]. Journal of China Coal Society,2023,48(9):3360-3371.
- [14] WANG C Y, ZHANG D M, YU B C, et al. Deformation and

- seepage characteristics of coal under true triaxial loading-unloading[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2023, 56: 2673-2695.
- [15] 马文涛,潘俊锋,马小辉,等. 高应力巷道底板冲击机制及多层次防治技术[J]. 采矿与岩层控制工程学报,2025,7(1):179-190.
- MA Wentao, PAN Junfeng, MA Xiaohui, et al. Mechanism of high stress roadway floor rock burst and multi-level prevention and control technology [J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2025, 7(1): 179-190.
- [16] 石锦民,李玉福,胡海峰,等. 柔模墙沿空留巷及爆破防治巷道底鼓研究[J]. 工矿自动化,2025,51(10):159-166.
- SHI Jinmin, LI Yufu, HU Haifeng, et al. Study on roadway floor heave control by flexible formwork wall gob-side entry retaining and blasting pressure relief[J]. Journal of Mine Automation, 2025, 51(10):159-166.
- [17] 刘纪良,陈诚,赵明,等. 深部高应力断层破碎带巷道底鼓控制与修复技术[J]. 矿冶,2025,34(6):906-913.
- LIU Jiliang, CHEN Cheng, ZHAO Ming, et al. Control and repair technology for floor heave in roadways within deep high-stress fault fracture zones[J]. Mining and Metallurgy, 2025, 34(6): 906-913.
- [18] 魏军强,徐营,徐自强,等. 巷道底鼓过程中能量转移规律及其控制研究[J]. 金属矿山,2021(2):29-35.
- WEI Junqiang, XU Ying, XU Ziqiang, et al. Research on the transfer law and control of energy in the process of floor heave of roadway [J]. Metal Mine, 2021 (2): 29-35.
- [19] 谭雅五,赵光明,程详,等. 坚硬顶板小煤柱沿空掘巷切顶卸压关键参数研究[J]. 中国安全生产科学技术,2025,21(2):99-107.
- TAN Yawu, ZHAO Guangming, CHENG Xiang, et al. Study on key parameters of roof cutting and pressure relief in small coal pillar gob-side entry driving with hard roof [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2025, 21(2): 99-107.
- [20] 华心祝,李琛,王仙龙,等. 深井切顶留巷围岩变形机理与分区治理技术研究[J]. 采矿与安全工程学报,2024,41(4):655-665.
- HUA Xinzhu, LI Chen, WANG Xianlong, et al. The deformation mechanism and zoning control technology of surrounding rocks of the roof-cutting deep well [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2024, 41(4): 655-665.
- [21] 郭东明,亢鑫超,陆志颖,等. 软岩巷道挠曲型底鼓机理与底板桩基控制技术[J]. 矿业科学学报,2021,6(5): 536-547.
- GUO Dongming, KANG Xinchao, LU Zhiying, et al. Flexural floor heave mechanism and floor corner piles control technology in soft rock roadway [J]. Journal of Mining Science and Technology, 2021, 6(5): 536-547.
- [22] 瞿思嫣. 基于等效弹性地基梁模型的钢轨动力分析方法研究[D]. 长沙:中南大学,2022:10-39.
- [23] 钱鸣高,石平五,许家林. 矿山压力与岩层控制[M]. 2版. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2010: 25-32.
- [24] 刘敬东,吕坤,武智东,等. 厚硬顶板煤层二次采动巷道围岩破坏机理与控制研究[J]. 金属矿山,2024(12):77-87.
- LIU Jingdong, LYU Kun, WU Zhidong, et al. Study on failure mechanism and control of surrounding rock of secondary mining roadway in thick and hard roof coal seam [J]. Metal Mine, 2024 (12): 77-87.
- [25] 任中华,寇建新,高建成,等. 煤柱影响下远距离多煤层重叠开采覆岩运动规律[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2021,40(1):7-13.
- REN Zhonghua, KOU Jianxin, GAO Jiancheng, et al. Overlying rock movement law of long-distance multi-coal overlapping mining under the action of coal pillars[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2021,40(1):7-13.