

刘亚州, 史新帅, 宁建国, 等. 薄煤层坚硬顶板迎采对掘沿空巷道失稳机理及控制技术研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2026, 8(2): 023035.

LIU Yazhou, SHI Xinshuai, NING Jianguo, et al. Research on instability mechanisms and control technologies for gob-side roadways in thin coal seams with hard roof under mining-excavation interaction[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2026, 8(2): 023035.

薄煤层坚硬顶板迎采对掘沿空巷道失稳机理及控制技术研究

刘亚州, 史新帅, 宁建国, 刘广文, 田新成, 周 帅

(山东科技大学 能源与矿业工程学院, 山东 青岛 266590)

摘要: 针对滨湖煤矿薄煤层坚硬顶板条件下迎采对掘沿空巷道围岩变形剧烈、维护困难的问题, 综合运用理论分析、数值模拟与现场试验方法, 深入探究了邻空侧覆岩运动特征、垮落结构形态及其诱发的巷道失稳机理, 优化了切顶卸压护巷的关键技术参数并进行工程应用。研究表明: 16煤上覆岩层存在两层主导性的关键层, 其结构特征与力学行为控制着邻空侧岩层的运动规律与垮落结构形态, 该区域侧向悬顶在其动态演化(形成、运动及垮落)过程中, 对巷道围岩施加了显著的多次动载冲击与高静载应力作用, 显著增大了巷道破坏失稳风险。基于最大主应力偏张量评价指标, 优化确定切顶高度为16m、切顶角度为 10° , 并通过现场试验进一步优化了爆破参数, 确定深孔爆破间距为2m、浅孔爆破间距为1m。此外, 为提高巷道围岩承载能力, 采用了“锚网索带”主体支护结合“单元支架”临时补强的综合支护体系。矿压观测表明, 巷道围岩变形得到有效控制, 在工作面后方滞后约140m处即达到自稳状态, 验证了切顶卸压护巷技术在解决薄煤层坚硬顶板沿空巷道维护难题方面的有效性。

关键词: 迎采对掘; 沿空巷道; 覆岩结构; 切顶卸压; 偏应力

中图分类号: TD322

文献标志码: A

文章编号: 2096-7187(2026)02-3035-13

Research on instability mechanisms and control technologies for gob-side roadways in thin coal seams with hard roof under mining-excavation interaction

LIU Yazhou, SHI Xinshuai, NING Jianguo, LIU Guangwen, TIAN Xincheng, ZHOU Shuai

(College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: Addressing the technical challenges of severe deformation and maintenance difficulties in gob-side roadways with retained pillars under hard roof and thin coal seam conditions during mining-excavation interaction at Binhu Coal Mine, this study employs integrated theoretical analysis, numerical simulation, and field experiments to investigate the movement characteristics of the adjacent goaf-side overlying strata, the morphology of the caving structure, and the induced roadway instability mechanism. Key parameters for roof-cutting pressure relief and roadway protection were optimized and applied in engineering practice. The research

收稿日期: 2025-05-28

修回日期: 2025-08-11

责任编辑: 许书阁

DOI: 10.13532/j.jmsce.cn10-1638/td.2025-1178

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52204100)

作者简介: 刘亚州(2000—), 男, 山东济宁人, 硕士研究生。E-mail: 15154753705@163.com

通信作者: 史新帅(1990—), 男, 山东泰安人, 博士, 硕士生导师。E-mail: xs_shi@sdust.edu.cn

indicates that two dominant key strata exist within the overburden of the No. 16 coal seam. Their structural characteristics and mechanical behavior govern the movement patterns and caving structure morphology of the adjacent strata. The dynamic evolution (formation, movement, and caving) of the lateral suspended roof in this zone subjects the roadway surrounding rock to significant multiple dynamic load impacts and high static stress, substantially increasing the risk of roadway instability and failure. Using the maximum principal stress deviatoric as the evaluation indicator, the optimal roof-cutting height and angle were theoretically determined as 16 m and 10° , respectively. Field tests further optimized the blasting parameters, establishing a spacing of 2 m for deep boreholes and 1 m for shallow boreholes. Additionally, a comprehensive support system comprising a primary "bolt-mesh-cable-belt" support combined with temporary reinforcement using "unit hydraulic props" was proposed to enhance the load-bearing capacity of the surrounding rock. Ground pressure monitoring confirmed that roadway deformation was effectively controlled, achieving a self-stabilized state approximately 140 m behind the working face. This validates the effectiveness of the roof-cutting pressure relief technology in resolving the maintenance challenges of gob-side roadways under thin coal seam and hard roof conditions.

Key words: mining-excavation interaction; gob-side roadway; structural of roof strata; roof cutting and pressure relief; deviatoric stress

煤炭作为我国主体能源, 在未来很长的时期内难以被大规模替代^[1]。但随着我国煤炭几十年的开采, 特别是在我国东部矿区, 许多煤矿的中厚煤层资源面临枯竭, 开采薄煤层已成必然选择^[2]。针对薄煤层开采工作面临的难点问题, 国内外专家开展技术攻关, 加之智能化助力, 使得薄煤层工作面推采速度得到大幅提高^[2-3]。但是薄煤层回采巷道为半煤岩巷与岩巷, 掘进速度慢, 极易导致采掘失衡, 工作面接替紧张, 影响薄煤层矿井的正常生产^[4-5]。

迎采动工作面掘进巷道可有效缓解工作面接替紧张, 但此类巷道经历毗邻工作面开采全过程动压影响, 特别是煤柱尺寸较小时, 形成沿空巷道, 极易出现冒顶、底臃和煤柱失稳垮塌及支护构件失效等问题, 巷道维护困难^[6-9]。为此, 众多学者对迎采巷道稳定性控制开展了大量研究, 并取得了丰硕成果。张农等^[10]认为迎采动小煤柱沿空掘巷受到邻近工作面侧向顶板破断、转动及稳定的全过程动压影响后, 巷道围岩承载能力急剧下降, 对此提出了预拉力锚网索组合支护技术; 邱旭峰^[11]通过数值模拟获得了坚硬顶板下迎采对掘巷道围岩的垂直应力动态演化规律, 揭示了巷道围岩变形破坏机理, 采用密集孔卸压技术解决了巷道变形破坏严重等问题; 王猛等^[12]采用数值模拟发现迎采对掘沿空巷道在经历采动期间, 巷道顶板与煤柱变形剧烈, 呈现非对称性, 提出了以高强度大延伸率锚杆与高水

速凝材料注浆加固煤柱措施; 陈定超等^[13]通过分析迎采巷道的围岩能量-应力全周期演化规律, 优化了煤柱尺寸, 提出了巷道围岩分区控制技术, 确定了锚杆索支护参数; 张雷^[14]认为张双楼煤矿 9 煤直接顶中的厚硬砂岩会形成侧向悬顶, 使得相邻的掘进巷道处于较高的支承压力的下, 加大巷道变形与冲击危险性, 提出爆破切顶护巷防冲控制技术; 林榆昆等^[15]从顶板结构与释放坚硬岩层应力和积蓄的弹性势能的角度出发, 提出了迎采动巷道的水力压裂切顶方法, 解决了受动静载作用下的迎采动巷道的变形与失稳问题; 康志鹏等^[16]分析了薄煤层沿空巷道迎采掘进段围岩内最大剪应力分布规律, 确定了 5 m 的护巷煤柱宽度, 采用了“小煤柱对穿锚索双向固定+顶板—梁三柱”补强支护的方案; 黄万朋等^[17]为保证薄煤层留小煤柱双巷布置下受采动影响的下一工作面巷道的稳定性, 提出了一种以“超前断顶+对穿锚索+钢管混凝土墩柱”为主体的复合加固高强支护技术, 并获得成功。然而, 针对薄煤层坚硬顶板条件下迎采对掘小煤柱沿空巷道的失稳原因及切顶护巷技术研究较少, 且数值模拟中对切顶效果的评价指标单一, 缺乏对围岩应力环境的综合分析。

因此, 笔者以滨湖煤矿迎采对掘 31602 材料巷为背景, 对薄煤层坚硬顶板条件下巷道邻空侧覆岩运动与垮落结构特征进行系统研究, 揭示此类沿空巷道失稳机理, 并提出控制技术措施, 为类似条件

巷道围岩稳定性控制提供借鉴。

1 工程背景

1.1 工程地质条件

滨湖煤矿 316 采区当前正在开采 31606 工作面, 工作面平均埋深 571.5 m, 煤层平均厚度 1.41 m,

普氏系数 2~4, 倾角 5°, 结构简单。煤层顶板以石灰岩、泥岩和砂质泥岩为主, 经过测定 3 种岩性单轴抗压强度分别为 102.93, 50.14, 75.92 MPa, 硬度大, 属于坚硬顶板。底板以泥岩、砂质泥岩为主, 单轴抗压强度较低, 硬度系数为 4~5。16 煤及其顶底板岩层力学参数见表 1。

表 1 16 煤及其顶底板岩层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of the No. 16 coal seam and its roof and floor strata

位置	岩石名称	厚度/m	容重/(kN·m ⁻³)	弹性模量/GPa	抗拉强度/MPa	抗压强度/MPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
顶板	砂质泥岩	13.08	25.38	5.32	5.72	80.69	0.32	5.26	30
	九灰	2.79	28.03	8.02	7.83	92.57	0.30	6.21	31
	15 煤	0.43	15.96	0.8	1.43	16.34	0.36	0.96	30
	砂质泥岩	5.26	25.87	4.65	3.16	64.83	0.33	3.83	33
	砂泥岩互层	17.65	26.41	3.92	4.34	50.14	0.36	3.95	35
	砂质泥岩	9.60	26.51	4.65	3.03	75.92	0.34	4.04	27
	十上灰岩	0.45	27.26	7.42	6.83	130.32	0.32	6.20	36
	泥岩	1.42	25.29	3.31	2.51	46.17	0.33	2.31	38
	十下灰岩	4.50	26.04	7.75	6.37	102.93	0.31	5.62	35
煤层	16 煤	1.41	16.61	1.71	1.96	20.42	0.37	1.81	26
	泥岩	2.70	24.48	3.04	2.69	40.28	0.34	2.09	29
底板	十一灰岩	0.99	28.73	7.84	6.06	80.51	0.32	5.61	39
	17 煤	0.64	15.79	1.35	1.45	17.63	0.33	1.10	31
	砂质泥岩	9.45	25.92	5.21	4.27	70.58	0.31	3.43	29

为缓解采掘接续紧张并提高资源回收率, 矿方决定在 31606 工作面开采期间迎工作面推进方向沿顶掘进相邻 31602 材料巷, 区段留设煤柱尺寸 5 m, 其位置关系如图 1 所示。

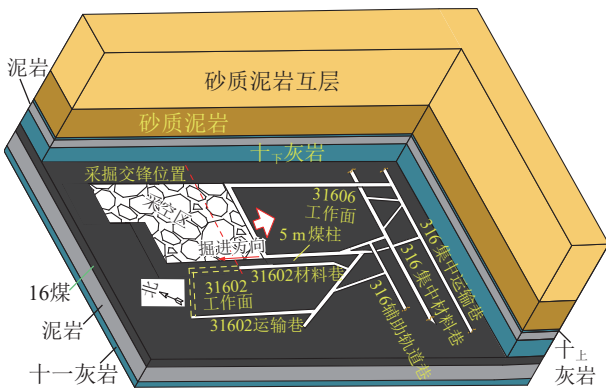


图 1 采掘工作面平面布置

Fig. 1 Layout of mining and excavation working faces

1.2 煤层顶板岩层结构分析

1.2.1 顶板岩层结构划分

基于经典矿压的覆岩组合结构理论^[18], 直接顶

厚度一般为 2~3 倍的采高, 基本顶厚度一般为 5~6 倍的采高, 得出 16 煤直接顶厚度为 4.50 m, 基本顶厚度为 4.50~15.97 m。

1.2.2 对沿空巷道稳定性具有影响作用的岩层范围

随着工作面开采, 煤层上方一定范围内的岩层将发生剧烈运动^[19], 对沿空巷道的稳定性有着直接影响, 其范围可采用式 (1), (2) 计算^[20]。

$$M - \sum_{i=1}^{n-1} k_{pi} \times h_i = \Delta_n \leq 0 \quad (1)$$

$$H = \sum_{i=1}^{n-1} h_i \quad (2)$$

式中, Δ_n 为第 n 层岩层压缩矸石后的下沉量, m, 当其小于零时这一岩层及以上岩层将不会向下产生剧烈运动^[20]; k_{pi} 为第 i 层岩层残余碎胀系数, 根据文献[20~22]提供的岩石碎胀系数以及与垂直压力关系式, 依据滨湖煤矿实际条件进行各岩层残余碎胀系数计算得出 $k_{p1}=1.17$, k_{p2} 、 $k_{p3}=1.27$, $k_{p4}=1.05$; H

为具有影响作用的岩层高度, 计算得出 15.97 m。

众多研究表明, 关键层主导岩层运动和垮落结构, 显著影响巷道围岩的应力分布和稳定性^[15, 23-27]。将表 1 中数据代入关键层判别式 (3), (4)^[23-25], 获得具有影响作用的上覆岩层中关键层分布。

$$q_n(x)|_m = E_n h_n^3 \sum_{i=n}^m \gamma_i h_i / \sum_{i=n}^m E_i h_i^3 \quad (3)$$

$$q_n(x)|_{m+1} < q_n(x)|_m \quad (4)$$

式中, $q_n(x)$ 为煤层上方第 m 层岩层对第 n 层岩层的载荷作用; h_i , γ_i , E_i 分别为第 i 层岩层的厚度、容重和弹性模量, 其中 $i=n, n+1, m$ 。

当满足式 (4) 时, 第 $m+1$ 层岩层为关键层。

覆岩中关键层分布结果见表 2, 在具有影响作用的上覆岩层中存在 2 层关键层, 分别为 16 煤层上方的十_下灰岩 (厚 4.50 m) 和 6.37 m 处的砂质泥

岩 (厚 9.60 m), 在覆岩中形成了近距离关键层组。

表 2 覆岩中关键层分布

Table 2 Distribution of key layers in the overlying strata

关键层类别	岩石名称	距 16 煤 距离/m	厚度/m	所承载 荷/kPa	断裂步 距/m
基本顶关键层	砂质泥岩	6.37	9.60	254.50	19.22
直接顶关键层	十 _下 灰岩	0	4.50	163.02	16.24

2 上覆岩层运动与垮落特征分析

31606 工作面开采引起的采空区侧上覆岩层运动及结构变化是影响 31602 材料巷稳定的关键因素。针对 16 煤上覆岩层结构与 316 采区采掘安排, 对 31602 材料巷采空区侧向覆岩运动特征及垮落结构分析, 如图 2 所示。

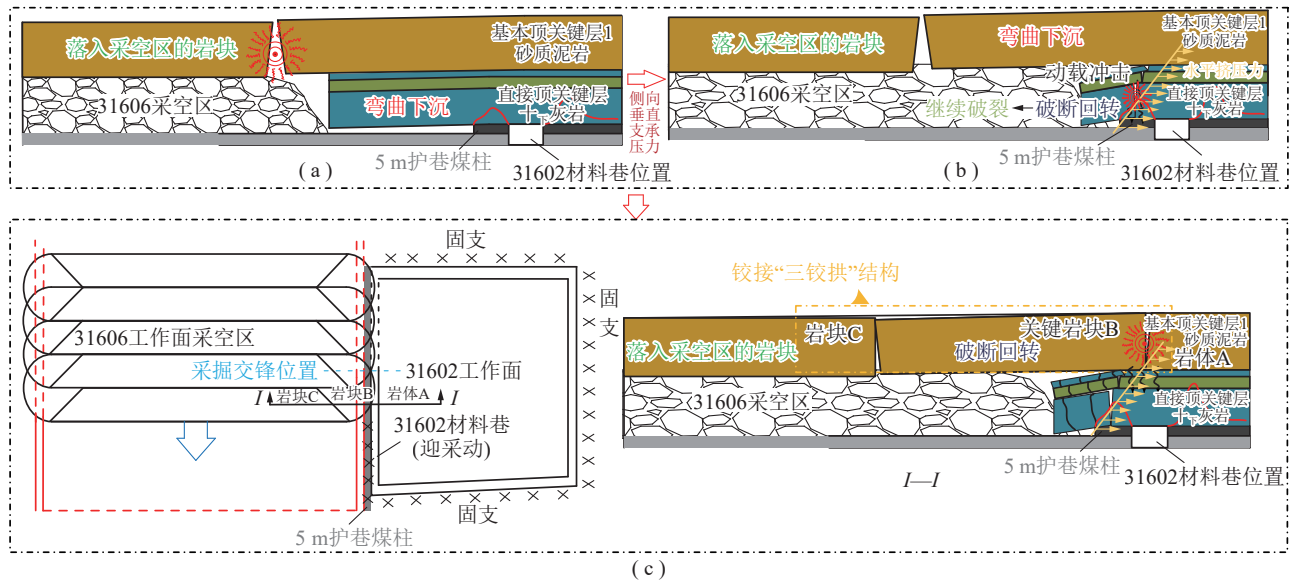


图 2 采空区侧覆岩运动特征及垮落结构

Fig. 2 Characteristics of lateral overlying strata movement and caving structure in the goaf area

31606 工作面开采后, 煤层顶板上方各关键层及其控制岩层由下而上开始运动, 并在达到其极限跨度后发生的断裂垮落。在采空区边缘, 关键层凭借其厚度大、强度高、整体性好等特点, 加之下部煤岩体的支承, 形成侧向悬顶。

研究表明^[9, 20, 25-27], 第 n 层关键层侧向悬顶如何运动及垮落结构特征主要取决于其位置、厚度 h_n 、悬顶极限下沉量 W_n 、断裂悬顶长度 l_n 和极限回转量 J_n 以及下部空间的允许下沉高度 Δ_n , 其主要判据为: ①当 $W_n > \Delta_n$ 时, 侧向悬顶在不受其他扰动下 (高

位关键层破断对下部岩层产生动载冲击等现象), 会以悬臂梁的形式存在; ②当 $W_n < \Delta_n$, 则关键层侧向悬顶以“悬臂梁”形式弯曲下沉, 最终发生断裂, 发生回转运动; ③当该关键层位于直接顶岩层范围内, 由于下部无充足的研石缓冲, 断裂的悬顶在回转中继续被弯拉断裂, 变成更短的岩块, 最终成为破碎的研石, 充填采空区; ④当该关键层位于基本顶范围内, 由于下部空间不足, 岩层断裂成岩块落入采空区, 回转中的断裂悬顶与其他岩块发生挤压, 若 $l_n > 2h_n$ 且 $J_n > \Delta_n$, 则关键层断裂块体间可相互“铰接”

形成“砌体梁”结构。否则将会形成台阶岩梁等其他结构^[20-21]。

$$W_n = \frac{q_n l_n^4}{8E_n I_n} \quad (5)$$

$$J_n = h_n - \sqrt{\frac{2q_n l_n^2}{0.4\sigma_{cn}}} \quad (6)$$

式中, E_n 为第 n 层岩层弹性模量, GPa; I_n 为岩层的截面矩, ($I_n=h^3/12$); σ_{cn} 第 n 层关键层的抗压强度。

采用式 (1)、(2)、(5) 与 (6) 结合表 1、2 中数据, 对各关键层侧向悬顶特征参数计算, 并代入上述判据中分析, 得到沿空巷道邻空侧覆岩运动特征与垮落结构, 见表 3。

表 3 沿空巷道邻空侧覆岩特征参数、运动特征及垮落结构

Table 3 Characteristic parameters, movement characteristics, and caving structures of overlying strata in the goaf area in gob-side roadways

关键层位置	岩石名称	W_n 与 Δ_n 关系	h_n 与 l_n 的关系	J_n 与 Δ_n 的关系	运动特征与垮落结构
基本顶	砂质泥岩	0.015 m < 0.77 m	2×9.6 m < 19.22 m	7.12 m > 0.77 m	悬臂梁弯曲下沉→断裂悬顶回转下沉→形成“砌体梁”结构
直接顶	十 _下 灰岩	0.012 m < 1.41 m	2×4.5 m < 16.24 m	3.05 m > 1.41 m	悬臂梁弯曲下沉→断裂悬顶回转下沉→破碎的矸石

综上所述, 31606 工作面开采后, 其顶板上方关键层十_下灰岩, 首先形成侧向悬顶, 造成煤柱受力集中, 随后侧向悬顶在自重和上部岩层载荷的作用下发生弯曲下沉 (图 2(a)); 由于采空区无垮落矸石对十_下灰岩进行有效支承, 进一步发生断裂, 产生回转运动, 最终触底 (图 2(b)); 随着关键层十_下灰岩及其上方软弱岩层垮入采空区, 关键层砂质泥岩下方具备了一定的运动空间, 其采空区边缘的侧向悬顶同样也将经历弯曲下沉、破断回转两个阶段, 最终形成关键岩块 B, 并以砌体梁的形式作用在沿空巷道及其煤柱上方, 为造成沿空巷道失稳的关键因素 (图 2(c))。

3 最大主偏应力张量分布及失稳机理

3.1 最大主偏应力张量分布

由弹塑性力学理论^[28-29]可知, 应力偏张量代表着岩体内剪切应力分布与大小, 控制着岩体的塑性变形, 为引起岩体发生破坏的主导应力。因此, 笔者采用最大主应力偏张量 s_1 作为迎采对掘小煤柱沿空巷道所处应力环境的优劣的评价指标, 它同时考虑 3 个主应力 (所有的正应力和切应力), 克服了单一垂直或水平应力等独立指标评价围岩稳定性的缺点, 其计算公式^[29]为

$$s_1 = \sigma_1 - \sigma_m, \sigma_m = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 3 \quad (7)$$

根据 31602 材料巷地质条件和采掘安排, 利用 FLAC^{3D} 建立迎采对掘小煤柱沿空巷道数值计算分析模型。模型尺寸为 $x \times y \times z = 390 \text{ m} \times 300 \text{ m} \times 70 \text{ m}$, 前后左右及下部设置固定边界, 上部施加 12.75 MPa

载荷, 等效其余岩层自重。各岩层采用 Mohr-Coulomb 本构模型, 模拟参数见表 1。

如图 3 所示, 数值模拟结果表明, 当 31606 工作面开采后, 显著提高了 31602 材料巷围岩内的最大主应力偏张量水平, 使沿空巷道处高应力环境下。未切顶时的最大主应力偏张量云图如图 4(a) 所示。

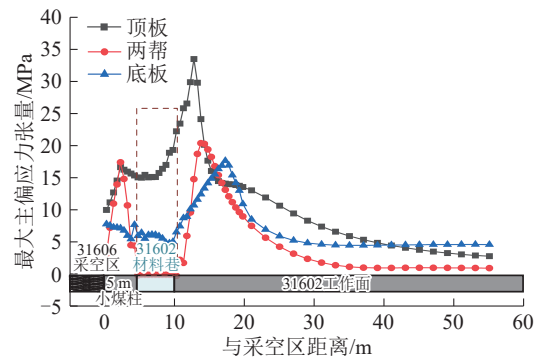


图 3 迎采对掘坚硬顶板下沿空巷道最大主偏应力张量分布

Fig. 3 Distribution of maximum principal stress deviation of gob-side roadway under hard roof during mining-excavation interaction

鉴于最大主应力偏张量的集中程度是诱发围岩剪切变形与破坏的关键指标, 其值的显著升高直接反映了巷道围岩稳定性降低、失稳风险加剧的趋势。因此, 为有效改善巷道所处应力环境、保障围岩稳定, 必须采取针对性的卸压措施。

3.2 迎采对掘坚硬顶板下沿空巷道失稳机理

对采掘安排、顶板岩层结构及 31602 材料巷采

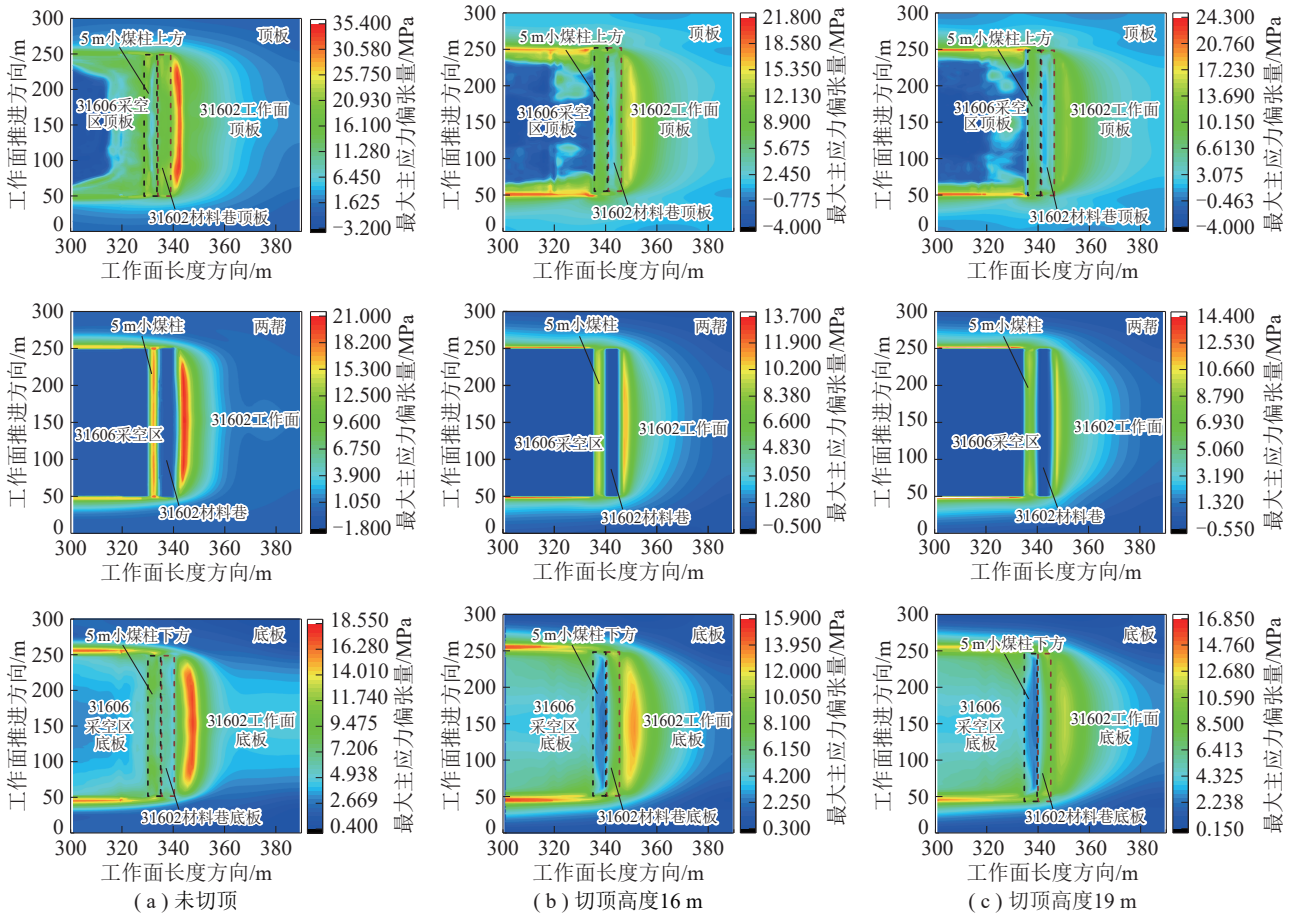
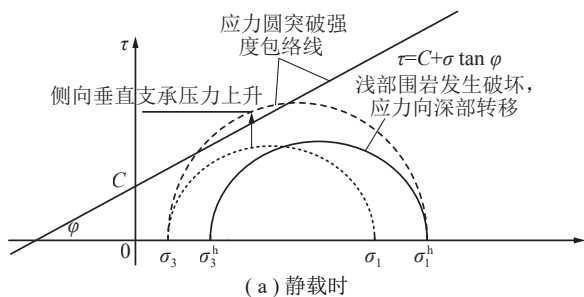


图4 不同切顶高度下最大主应力偏张量云图

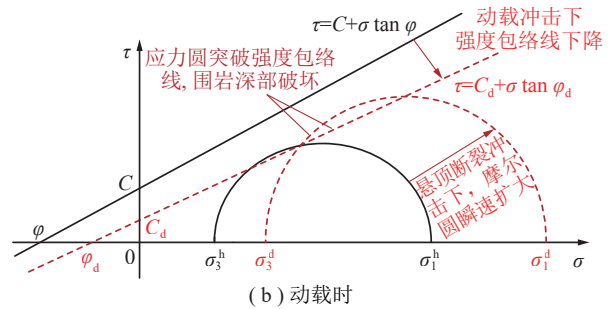
Fig. 4 Contours of maximum principal stress deviation under different roof-cutting heights

空区侧覆岩运动特征及垮落结构进行分析后, 得到该沿空巷道围岩变形破坏原因。

(1) 工作面开采后, 巷道邻空侧出现各关键层的侧向悬顶, 增大对其侧向垂直支撑压力(图 2(a)), 导致围岩内主应力 σ_1 升高 ($\sigma_1 \rightarrow \sigma_1^h$)。由莫尔-库仑准则可知, 岩石内一点应力圆在强度曲线内, 该所处应力状态是安全的, 否则出现剪切破坏。如图 5(a) 所示, 当 σ_1^h 与巷内支护提供的 σ_3 所构成的应力圆超过围岩体强度包络线时, 将引起巷道围岩浅部发生剪剪破坏, 引起巷道变形, 同时 σ_1^h 由更深层围岩继续承担 ($\sigma_3 \rightarrow \sigma_3^h$);



(a) 静载时



(b) 动载时

图5 迎采对掘坚硬顶板下沿空巷道失稳演化过程

Fig. 5 Instability evolution process of gob-side roadway under hard roof during mining-excitation interaction

(2) 在侧向悬顶弯曲下沉时, 下沉量由右到左逐渐增大, 挤压下方的沿空巷道, 对围岩产生水平挤压力, 同时集聚弹性势能。如图 2(b)、(c) 与图 5(b) 所示, 悬顶破断时, 内部弹性势能瞬间释放, 形成多次动载冲击, 作用于沿空巷道围岩上, 降低围岩承载能力, 导致强度包络线下降, 同时内部应力瞬间升高^[30-31], 应力圆瞬间增大, 突破围岩强度包络线, 围岩内部发生剪切破坏, 关键岩块 B 的回转持续增大水平挤压力, 引起煤柱水平错动, 最终造成巷道

失稳破坏。

4 切顶护巷关键参数

基于第 2 节, 若采取超前预裂切顶后(图 6), 各关键层侧向悬顶无法形成, 关键岩块 B 滑入采空区,

不会发生弯曲下沉、破断回转, 避免了多次动载与高静载作用下的围岩体承载力劣化, 降低了 31602 材料巷所在区域的应力。同时, 超前预裂切顶使在 31606 工作面与 31602 材料巷之间的关键层失去联系, 阻碍了采动应力向沿空巷道传播^[15, 20]。

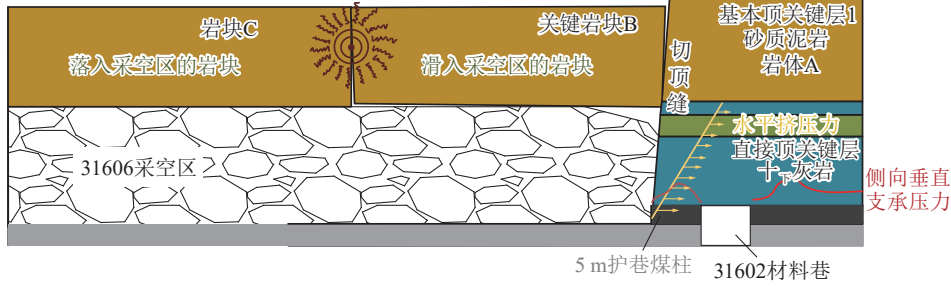


图 6 迎采对掘坚硬顶板下沿空巷道切顶护巷模型

Fig. 6 Roof-cutting roadway protection model of gob-side roadway under hard roof during mining-excavation interaction

4.1 切顶参数理论分析

4.1.1 切顶高度理论计算

由第 1 节可知, 切顶高度达到 15.97 m 时, 能将煤层上方两层关键层全部切断, 有利于沿空巷道稳定。

4.1.2 切顶角度理论计算

对于位于直接顶内的关键层, 切顶后无法形成砌体梁结构, 将直接垮落进入采空区, 向沿空巷道方向传递的载荷将会很小。因此, 重点考虑切顶角度对基本顶关键层中岩块 B 的影响。如图 7 所示, 采用预裂切顶后, 为了让岩块 B 顺利滑入采空区, 避免形成砌体梁结构, 减少其通过与之铰接的岩体 A 向巷道所在区域传递载荷。

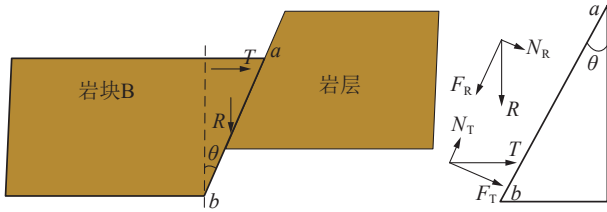


图 7 岩块 B 的切顶滑落失稳模型

Fig. 7 Sliding instability model of Rock Block B induced by roof-cutting

切顶缝处需要满足的“剪切力 \geq 滑动摩擦阻力”^[32], 即

$$R \cos \theta - T \sin \theta \leq (T \cos \theta + R \sin \theta) \tan \varphi \quad (8)$$

$$\theta \leq \arctan\left(\frac{R}{T}\right) - \varphi \quad (9)$$

式中, θ 为最大切顶角度; φ 为基本顶关键层 1 的内摩擦角, 取 27° ; T 为断面法向推力, kN; R 为破断面处两岩块间的切向剪力, kN。

基于钱鸣高院士等相关研究结果, 将顶板简化为梁模型, 即

$$T = \frac{qbl^2}{2(h - \Delta_s)} \quad (10)$$

$$R = qbl \quad (11)$$

式中, b 为梁模型宽度, 取 1 m; q 为该关键层载荷, 取 254.50 kPa; l 为该关键层周期断裂步距, 取 19.53 m; h 为厚度, 取 9.6 m; Δ_s 为下部空间的允许下沉高度, 取 0.77 m。

将以上数据代入式 (9), 计算获得 θ 最大值为 15.12° 。

4.2 切顶参数模拟优化

4.2.1 切顶高度模拟优化

选取切顶角度为 10° , 根据顶板岩层中起主导作用的关键层位置, 将切顶高度确定为 10、13、16 m 和 19 m。迎采对掘下不同切顶高度时最大主应力偏张量云图如图 4 所示。

为量化沿空巷道周围最大主应力偏张量变化规律, 避免边界效应影响, 提取模型中部顶底板及两帮的最大主偏应力张量数据。不同切顶高度下沿空巷道围岩最大主应力偏张量曲线如图 8 所示。由图 8 可知, 切顶后, 巷道所处围岩应力环境得到大幅改善。最大主应力偏张量在巷道围岩内均呈现单峰存在。在切顶高度从 0~19 m 过程中,

实体煤上方顶板内最大主应力偏张量峰值逐渐向深部转移, 其他位置最大主应力偏张量峰值位置无明显变化, 但峰值均逐渐降低。当切顶高度大于 16 m 时, 巷道周围最大主应力偏张量峰值的降低幅度明显减小。进一步结合前文对顶板结构分析, 16 m 的切顶高度已经足够可以将巷道上方两个具有影响作用的关键层切落。

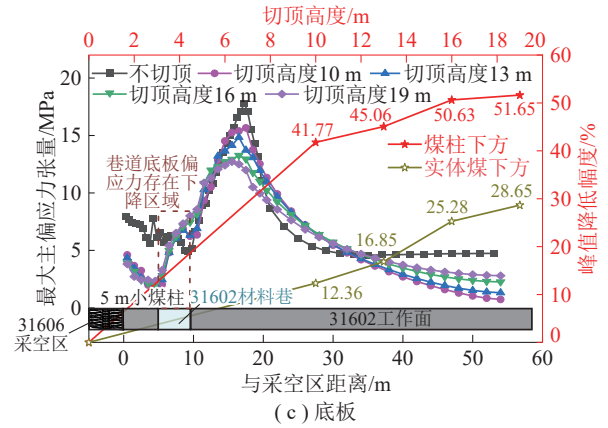
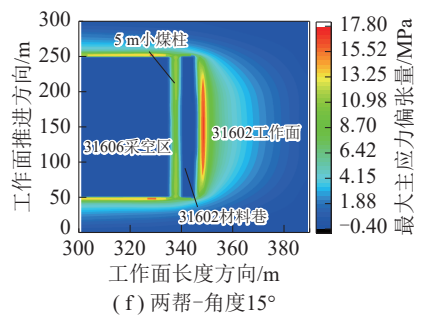
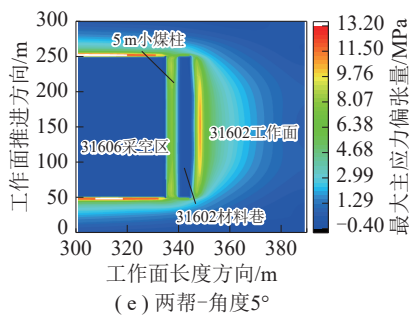
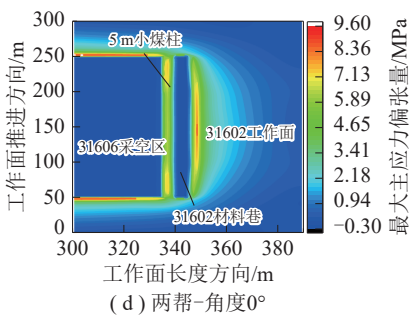
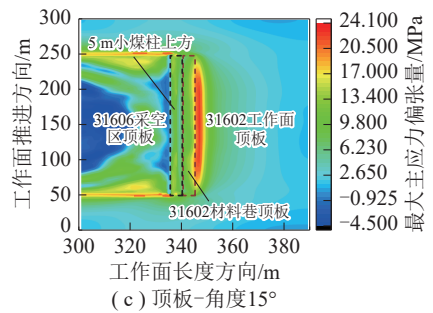
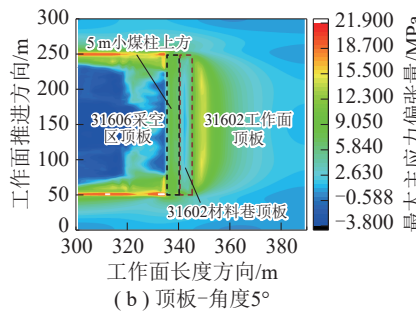
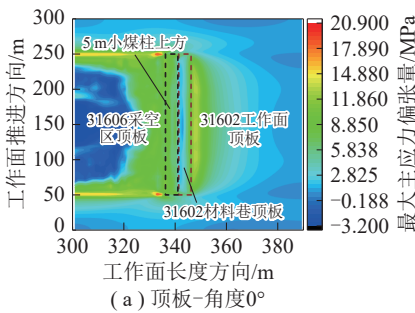
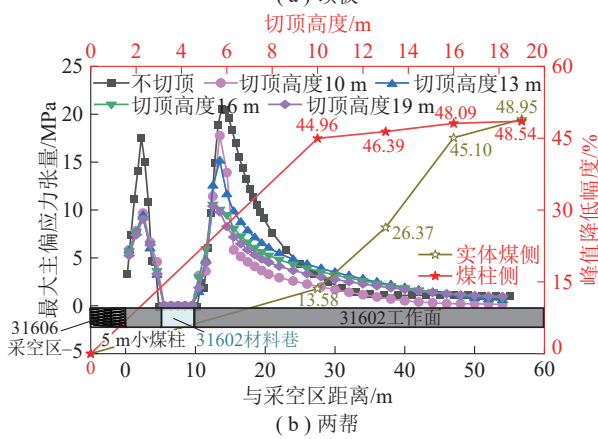
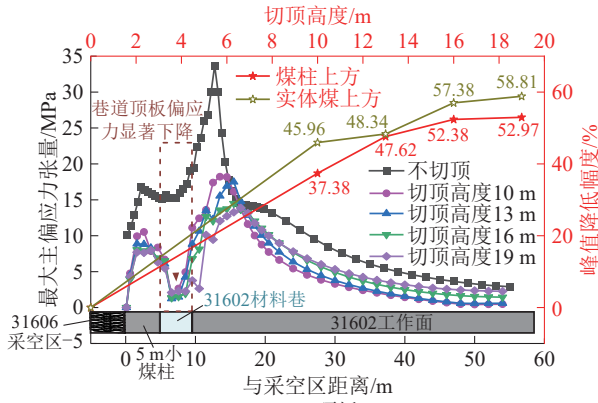


图 8 不同切顶高度下沿空巷道围岩最大主应力偏张量曲线

Fig. 8 Curves of maximum principal stress deviation in gob-side roadway ribs under different roof-cutting heights

4.2.2 切顶角度模拟优化

选取切顶高度为 16 m, 根据切顶角度的理论计算结果, 选取 0°、5°、10°和 15°。迎采对掘条件下不同切顶角度时最大主应力偏张量云图如图 9 所示。

不同切顶角度下沿空巷道最大主应力偏张量曲线如图 10 所示。由图 10 可知, 随着切顶角度的增加, 巷道围岩内最大主应力偏张量峰值逐渐增加, 应力环境逐渐恶化。当切顶角度达到 15°时, 巷道围岩内的最大主应力偏张量峰值急剧升高, 并且实体煤上方顶板内最大主应力偏张量峰值向浅部转移, 其他位置最大主应力偏张量峰值位置无明显变化。这是由于切顶角度的增大, 不利于关键岩块 B

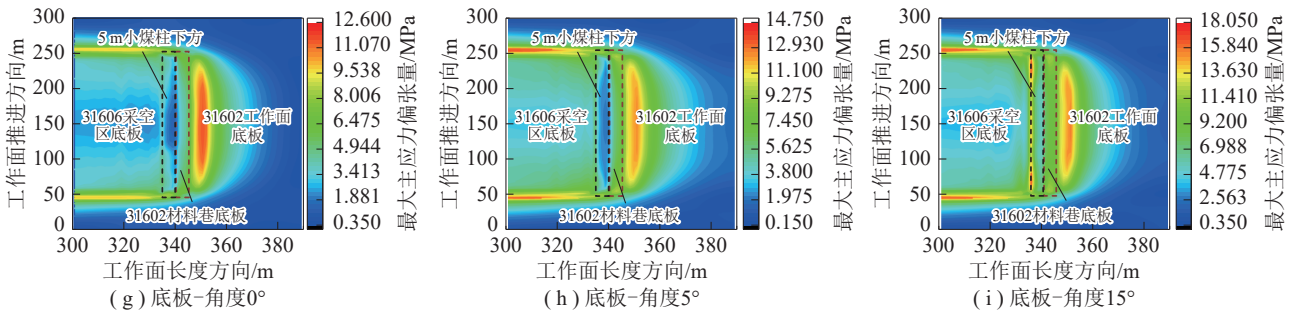


图9 不同切顶角度下最大主应力偏张量云图

Fig. 9 Contours of maximum principal stress deviation under different roof-cutting angles

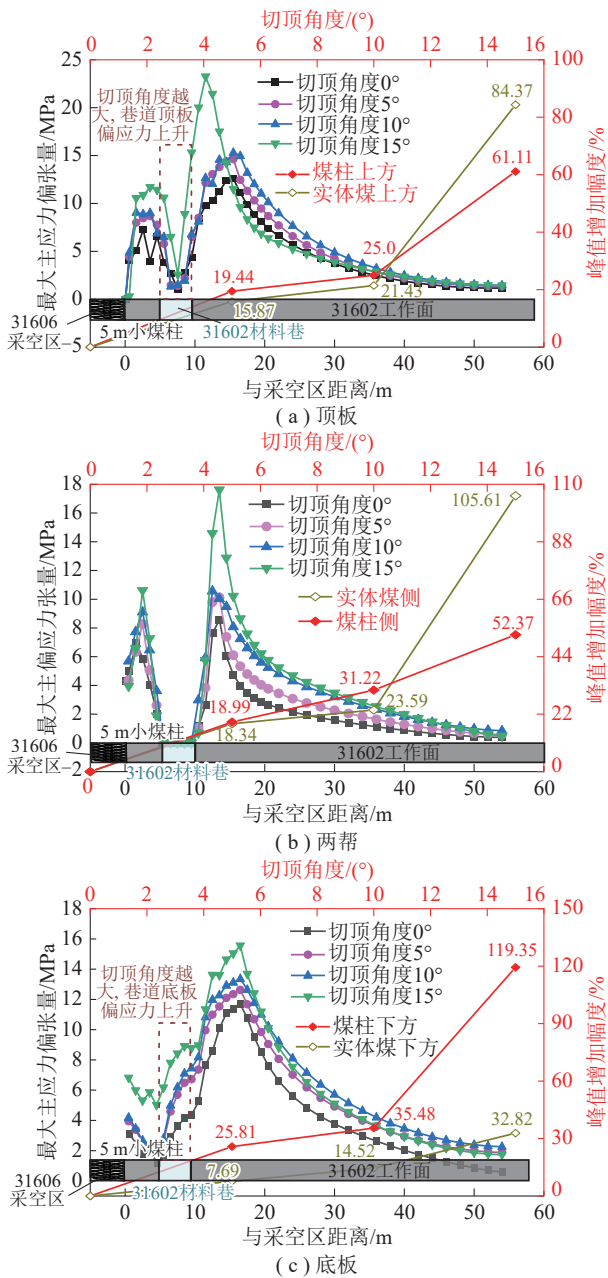


图10 不同切顶角度下沿空巷道最大主应力偏张量曲线
Fig. 10 Curves of maximum principal stress deviation in gob-side roadway ribs under different roof-cutting angles

的滑落,使得采空上方岩层的载荷传递给岩体 A,进而作用于巷道围岩上,引起围岩体内最大主应力偏张量升高。但在 5°~10°之内变化时,最大主应力偏张量的峰值增量却较少。

对于切顶角度选择,考虑到切顶角度为 0°时,切顶面两侧的滑动摩擦阻力较小,虽然对改善沿空巷道的应力环境最有效,但是采用超前预裂切顶,31606 材料巷切顶一侧的顶板由固支变为简支,且超前位置在采动应力影响下,更易引起顶板垮落,不利于原巷道的安全。为此,结合模拟结果,切顶角度确定为 10°。

5 工程试验

5.1 切顶护巷方案

基于第 3 节分析结果,确定切顶高度为 16 m,角度为 10°。与密集钻孔与水力压裂相比,爆破具有投入低、效率高、切顶效果好等优点,同时为将 31602 材料巷与 31606 工作面接触段的邻空侧上方具有影响作用的关键层全部切落,采用深-浅孔组合聚能爆破方式切顶。

通过现场爆破测试(图 11、12),发现在浅孔爆破孔前方 0.5 m、深孔爆破孔前方 1 m 处的观测孔内形成了连续裂缝,总长度达到 12.1 m,致裂效果明显。参考爆破测试结果,为使两相邻炮孔的裂隙损伤可相互贯通,深浅炮孔间距确定为 2 和 1 m。

5.2 支护方案

顶板采用 $\phi 20\text{ mm}\times 1\ 000/2\ 000\text{ mm}$ 左旋无纵肋螺纹钢式树脂锚杆,锚杆间排距为 900/1 400/825 mm $\times 3\ 000/1\ 500/3\ 000\text{ mm}$;同时施工 1 $\times 19-\phi 21.8\text{ mm}\times 6\ 000\text{ mm}$ 预应力锚索,压 280 mm $\times 5\text{ mm}\times 3\ 500\text{ mm}$ 型 W 钢带,锚索间排距 1 400 mm $\times 1\ 500\text{ mm}$ 。帮部采用 $\phi 18\text{ mm}\times 2\ 000/1\ 500\text{ mm}$ 右旋

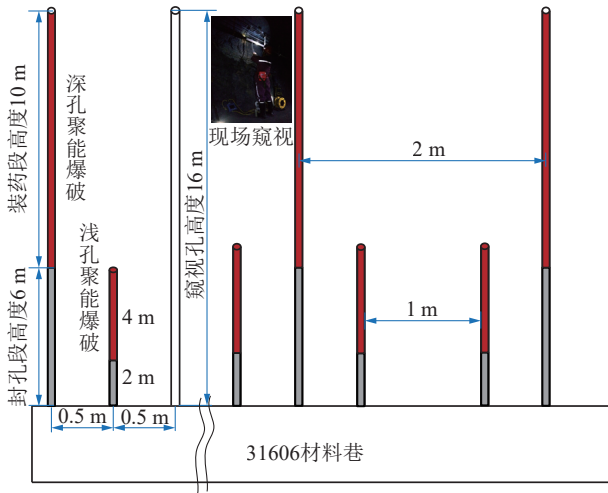


图 11 爆破钻孔布置及窥视

Fig. 11 Layout and inspection of blasting boreholes

等强螺纹钢式树脂锚杆, 锚杆间排距为 $1\ 100\ \text{mm} \times 1\ 000\ \text{mm}$, 压 $180\ \text{mm} \times 5\ \text{mm} \times 2\ 500\ \text{mm}$ 型 W 钢带; 每排施工锚索, 实体煤侧自顶板向下 $800\ \text{mm}$ 施工 $1 \times 19 - \phi 21.8\ \text{mm} \times 3\ 000\ \text{mm}$ 预应力锚索 1 根, 排距 $2\ 000\ \text{mm}$; 煤柱侧自顶板向下 $800\ \text{mm}$ 施工 $1 \times 19 - \phi 21.8\ \text{mm} \times 5\ 600\ \text{mm}$ 预应力锚索 1 根, 间距 $1\ 000\ \text{mm}$ 再施工 $1 \times 19 - \phi 21.8\ \text{mm} \times 5\ 600\ \text{mm}$ 预应力锚索 1 根,

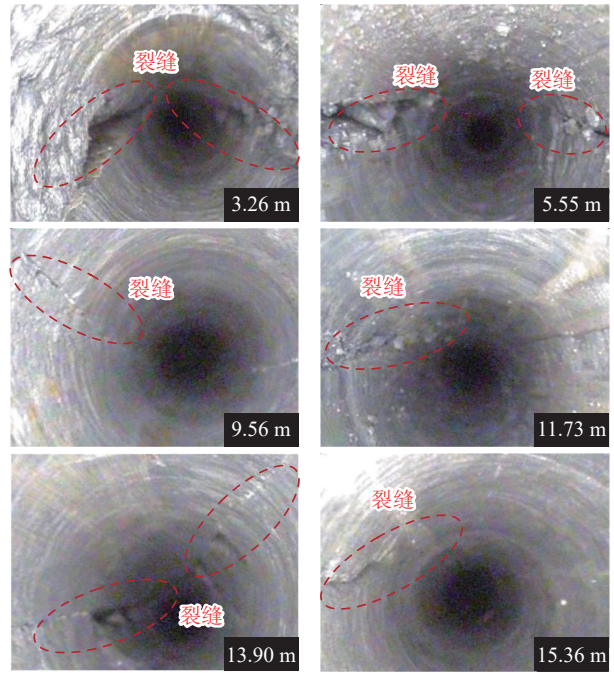


图 12 爆破后观测孔窥视结果

Fig. 12 Post-blasting inspection results of observation holes

排距 $2\ 000\ \text{mm}$ (图 13)。锚杆均配单泡让压管, 顶部锚索及帮部锚索在锁具与锚索托盘之间均配球形形垫。

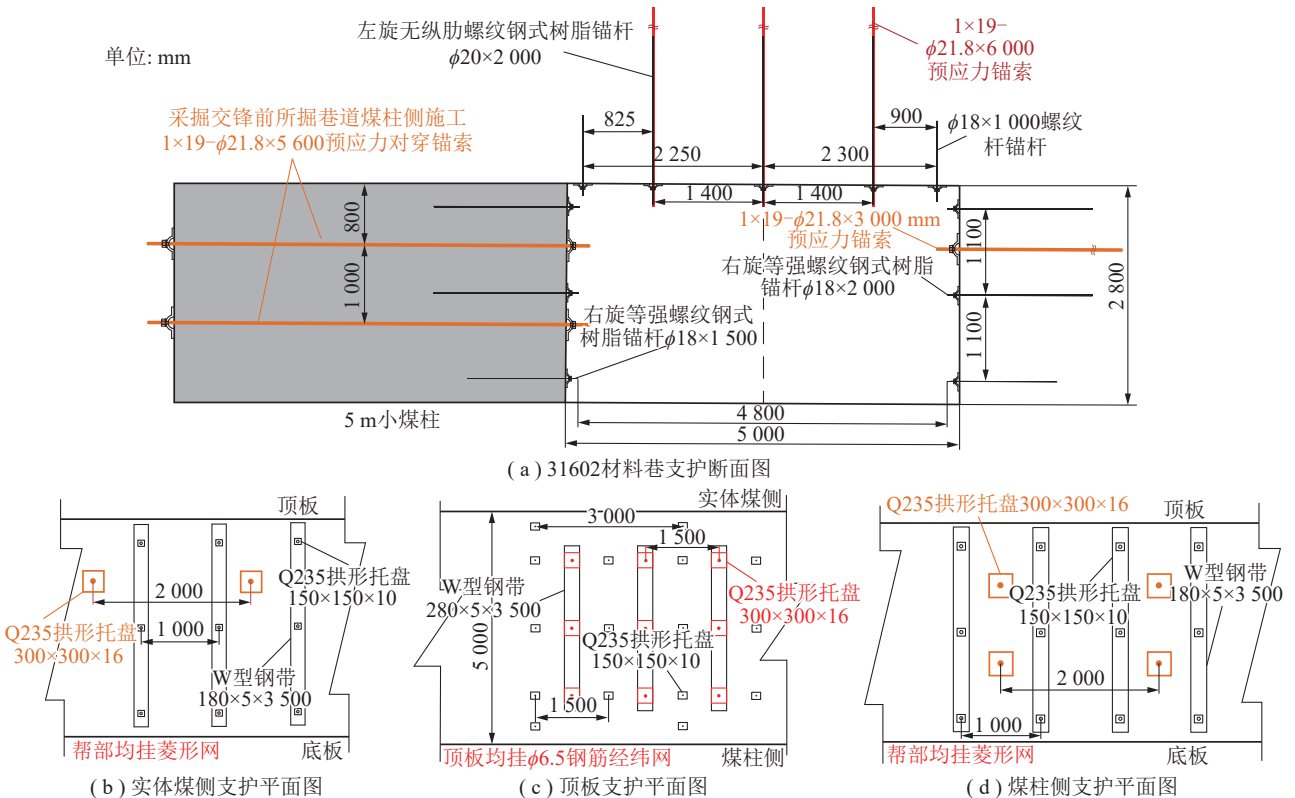


图 13 31602 材料巷支护参数

Fig. 13 Support parameters of the 31602 material roadway

根据本采区其他工作面开采经验, 当 31602 材料巷掘进工作面距 31606 开采工作面 150 m 时, 停止掘进, 并布置单元支架, 进行临时被动补强支护。

5.3 实施效果分析

为检验切顶卸压效果, 在 31602 材料巷停掘处

进行矿压观测。图 14 为 31602 材料巷矿压观测结果, 由图 14 可知, 在受 31606 工作面影响期间, 巷道顶底板与两帮最大位移变化量约为 28、12 mm, 顶底板与两帮最大位移分别约为 303、166 mm。31602 材料巷现场效果如图 15 所示。

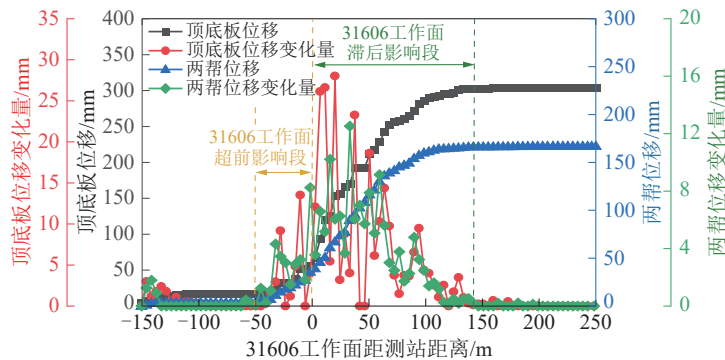


图 14 31602 材料巷矿压观测结果

Fig. 14 Ground pressure monitoring results of the 31602 material roadway



(a) 31606工作面开采中



(b) 31606工作面开采结束后

图 15 31602 材料巷现场效果

Fig. 15 Field application of the 31602 material roadway

31602 材料巷掘进工作面在滞后工作面约 140 m 时, 覆岩运动趋于稳定, 巷道实现自稳, 则可恢复掘进作业。

6 结论

(1) 根据 16 煤开采后上覆岩层的允许下沉量, 计算出了对 31602 材料巷稳定性具有影响作用的岩层范围为 15.97 m, 并利用关键层判别式确定出

该范围内存在近距离关键层组。

(2) 结合关键层所处位置、侧向悬顶极限下沉量、采空区允许下沉高度及岩层厚度与断裂悬顶长度的关系, 建立了沿空巷道邻空侧上覆岩层运动与垮落特征判据, 获得了沿空巷道邻空侧岩层垮落特征与运动方式, 并阐明关键层侧向悬顶形成及运动过程中导致沿空巷道失稳的作用机制。

(3) 采用数值模拟的方法, 以最大主应力偏张量为评价指标, 分析了不同切顶参数下 31602 材料巷围岩内的最大主应力偏张量分布特征, 确定了最优参数组合方案为“切顶高度 16 m、角度 10°”, 该方案显著改善巷道围岩应力环境。

(4) 采用深浅孔组合聚能爆破方式切顶, 通过现场爆破测试验证了良好的致裂效果, 并确定深-浅炮孔间距分别为 2 和 1 m。矿压观测显示, 巷道变形处于可控范围内, 在滞后工作面约 140 m 时实现自稳, 切顶卸压效果良好。

参考文献 (References):

- [1] 袁惊柱. “十四五”时期加快推动我国煤炭工业高质量发展[J]. 中国发展观察, 2021(23): 64-67.
 - [2] 余铜柱, 韩会军, 张建鹏, 等. 薄煤层智能化工作面成套开采装备研发及应用[J]. 煤矿机械, 2025, 46(6): 168-171.
- YU Tongzhu, HAN Huijun, ZHANG Jianpeng, et al. Research and application of complete set of mining equipment for thin coal seam intelligent working face[J]. Coal

- Mine Machinery, 2025, 46(6): 168–171.
- [3] 罗文, 杨俊彩. 神东矿区薄煤层安全高效开采技术研究[J]. 煤炭科学技术, 2020, 48(3): 68–74.
LUO Wen, YANG Juncai. Study on safety and efficient mining technology of thin coal seam in Shendong mining area[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(3): 68–74.
- [4] 毛君, 杨润坤, 谢苗, 等. 煤矿智能快速掘进关键技术研究现状及展望[J]. 煤炭学报, 2024, 49(2): 1214–1229.
MAO Jun, YANG Runkun, XIE Miao, et al. Research status and prospects of key technologies for intelligent rapid excavation in coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(2): 1214–1229.
- [5] 李明科. 国产智能薄煤层掘锚一体机设计与应用[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(S1): 316–322.
LI Mingke. Design and application of domestic intelligent thin coal seam bolt-digging machine[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(S1): 316–322.
- [6] 陈晓祥, 王逸良, 张天. 迎采动面沿空掘巷围岩变形规律及控制技术[J]. 煤矿安全, 2020, 51(6): 66–71, 76.
CHEN Xiaoxiang, WANG Yiliang, ZHANG Tian. Deformation law and control technique of surrounding rock in gob-side entry driving under driven heading for adjacent advancing coal face conditions[J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(6): 66–71, 76.
- [7] 从常奎, 李瑞武, 孙亚超, 等. 迎采动掘进巷道围岩应力演化规律及分段控制技术[J]. 西安科技大学学报, 2024, 44(6): 1071–1082.
CONG Changkui, LI Ruiwu, SUN Yachao, et al. Stress evolution law and sectional control technology of surrounding rock in heading for adjacent advancing working face[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2024, 44(6): 1071–1082.
- [8] 彭亮. 迎采巷道围岩稳定的煤柱宽度效应与分段支护技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
PENG Liang. Coal pillar width effect and segmented support technology for surrounding rock stability of facing mining roadway[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2023.
- [9] 宋小飞. 迎采动工作面切顶卸压留小煤柱护巷矿压显现规律研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2021.
SONG Xiaofei. Pressure relief at cutting top of mining face Study on the regularity of mine pressure in retaining small coal pillar[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2021.
- [10] 张农, 李学华, 高明仕. 迎采动工作面沿空掘巷预拉力支护及工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(12): 2100–2105.
ZHANG Rong, LI Xuehua, GAO Mingshi. Pretensioned support of roadway driven along next gob and heading adjacent advancing coal face and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(12): 2100–2105.
- [11] 邸旭峰. 迎采对掘巷道密集孔卸压及分段控制技术研究[J]. 矿业安全与环保, 2024, 51(3): 137–143.
DI Xufeng. Research on the technology of pressure relief by intensive drilling and segmented control in facing excavation roadway[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2024, 51(3): 137–143.
- [12] 王猛, 柏建彪, 王襄禹, 等. 迎采动面沿空掘巷围岩变形规律及控制技术[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(2): 197–202.
WANG Meng, BAI Jianbiao, WANG Xiangyu, et al. The surrounding rock deformation rule and control technique of the roadway driven along goaf and heading for adjacent advancing coal face[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 29(2): 197–202.
- [13] 陈定超, 王襄禹, 柏建彪, 等. 迎采工作面沿空掘巷围岩能量-应力全周期演化规律[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(4): 162–175.
CHEN Dingchao, WANG Xiangyu, BAI Jianbiao, et al. The full cycle evolution law of energy-stress in the surrounding rock of the gob-side entry driving for adjacent advancing working face[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(4): 162–175.
- [14] 张雷. 冲击危险区迎采沿空巷道切顶护巷防冲技术[J]. 煤矿安全, 2021, 52(2): 98–104.
ZHANG Lei. Preventing rock burst technology by roof cutting and roadway protection in mining along goaf roadway of dangerous area[J]. Safety in Coal Mines, 2021, 52(2): 98–104.
- [15] 林榆昆, 刘江伟, 刘耀友, 等. 迎采掘进巷道水力切顶关键部位对顶板断裂行为的影响[J]. 煤炭学报, 2024, 49(S2): 593–605.
LIN Yukun, LIU Jiangwei, LIU Yaoyou, et al. The influence of key parts of hydraulic roof cutting and roof fracture behavior in mining roadway[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(S2): 593–605.
- [16] 康志鹏, 罗勇, 任波, 等. 复合顶板倾斜薄煤层小煤柱稳定机理与控制研究[J]. 矿业研究与开发, 2024, 44(9): 40–47.
KANG Zhipeng, LUO Yong, REN Bo, et al. Stability mechanism and control of small coal pillar in inclined thin coal seam with compound roof[J]. Mining Research and Development, 2024, 44(9): 40–47.
- [17] 黄万朋, 赵同阳, 江东海, 等. 双巷掘进留窄小煤柱布置方式及围岩稳定性控制技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(3): 617–629.
HUANG Wanpeng, ZHAO Tongyang, JIANG Donghai, et al. Arrangement of double entry driving with a narrow coal pillar in the middle and stability control technology

- of surrounding rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(3): 617–629.
- [18] 文志杰, 汤建泉, 王洪彪. 大采高采场力学模型及支架工作状态研究[J]. 煤炭学报, 2011, 36(S1): 42–46.
WEN Zhijie, TANG Jianquan, WANG Hongbiao. Study on mechanical model and hydraulic support working state in mining face with large mining height[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(S1): 42–46.
- [19] 谭云亮, 张修峰, 范德源, 等. 沿空侧向覆岩结构改性防冲机理与实践[J]. 煤炭学报, 2025, 50(1): 209–223.
TAN Yunliang, ZHANG Xiufeng, FAN Deyuan, et al. Mechanism and practice of structural modification to lateral overlying strata in gob-side entry for rockburst prevention[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(1): 209–223.
- [20] 路洋波, 闫少宏, 符鹏, 等. 大采高顶板复合结构传力机制与强矿压调控[J]. 采矿与安全工程学报, 2025, 42(4): 832–844.
LU Yangbo, YAN Shaohong, FU Peng, et al. Mechanisms of stress transfer and strong rock pressure control in composite structures of roof with large mining height[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2025, 42(4): 832–844.
- [21] GUO Wenbing, ZHAO Gaobo, LOU Gaozhong, et al. A new method of predicting the height of the fractured water-conducting zone due to high-intensity longwall coal mining in China[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2019, 52(8): 2789–2802.
- [22] 郭文兵, 李龙翔, 杨伟强, 等. 覆岩离层注浆层位判定及隔浆层稳定性研究[J]. 煤炭学报, 2025, 50(1): 264–280.
GUO Wenbing, LI Longxiang, YANG Weiqiang, et al. Determination of grouting layer and stability analysis of slurry-resisting overburden in separation grouting[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(1): 264–280.
- [23] 秦玄焯, 张英华, 黄志安, 等. 深井薄煤层保护层坚硬顶板破断机理及控制技术[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(11): 4010–4020.
QIN Xuanye, ZHANG Yinghua, HUANG Zhian, et al. Breaking mechanism and control technology of hard roof in deep and thin coal seam protective layer[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2021, 52(11): 4010–4020.
- [24] 许家林, 钱鸣高. 覆岩关键层位置的判别方法[J]. 中国矿业大学学报, 2000, 29(5): 463–467.
XU Jialin, QIAN Minggao. Method to distinguish key strata in overburden[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2000, 29(5): 463–467.
- [25] 钱鸣高, 许家林. 煤炭开采与岩层运动[J]. 煤炭学报, 2019, 44(4): 973–984.
QIAN Minggao, XU Jialin. Behaviors of strata movement in coal mining[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(4): 973–984.
- [26] 许磊, 李明伟, 郭亮, 等. 切近位关键层卸压沿空掘巷关键参数与工程应用[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(1): 91–100.
XU Lei, LI Mingwei, GUO Liang, et al. Key parameters and engineering application of roof cutting and pressure relief driving in cutting lower key stratum[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2023, 40(1): 91–100.
- [27] 罗磊. 厚硬砂岩顶板不等厚煤层开采矿压特征及控制技术[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2021.
LUO Lei. Study on open mining pressure characteristics and control technology of unequal thickness coal seam in thick hard sandstone roof[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2021.
- [28] 程月华, 周飞, 吴昊. 抗战斗部侵入爆炸作用的混凝土遮弹层设计[J]. 爆炸与冲击, 2023, 43(4): 113–130.
CHENG Yuehua, ZHOU Fei, WU Hao. Design of concrete shield against the combination of penetration and explosion of warheads[J]. Explosion and Shock Waves, 2023, 43(4): 113–130.
- [29] 邢世坤, 李辉, 冯少华. 深部孤岛充填工作面沿空掘巷围岩偏应力演化与控制[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2024, 43(4): 39–47.
XING Shikun, LI Hui, FENG Shaohua. Evolution and control of deviatoric stress in surrounding rock of gob-side entry in deep island filling work face[J]. Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science), 2024, 43(4): 39–47.
- [30] 余鑫, 边俊奇, 刘长友. 基于动压巷道围岩控制的临空侧顶板压裂释能参数确定[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2022, 4(1): 013016.
YU Xin, BIAN Junqi, LIU Changyou. Determination of energy release parameters of hydraulic fracturing roof near goaf based on surrounding rock control of dynamic pressure roadway[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2022, 4(1): 013016.
- [31] 王晓, 张学朋, 李文鑫, 等. 应力波作用下煤岩层面超低摩擦特征解析理论研究[J]. 煤炭学报, 2024, 49(11): 4495–4507.
WANG Xiao, ZHANG Xuepeng, LI Wenxin, et al. Analytical theoretical study on ultra-low friction characteristics of coal rock interfaces under stress wave action[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(11): 4495–4507.
- [32] 钱鸣高, 许家林, 王家臣, 等. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2021.