

采动影响下沿空掘巷围岩稳定性研究

卢德晨, 涂 敏, 付宝杰, 赵庆冲, 侯李鑫

安徽理工大学矿业工程学院, 安徽 淮南

收稿日期: 2025年2月21日; 录用日期: 2025年3月21日; 发布日期: 2025年5月12日

摘要

在矿井开采过程中, 沿空掘巷因其能够提高回采效率、优化通风系统而被广泛应用, 但其围岩稳定性易受采动影响, 存在较大安全风险。针对色连二矿12411工作面沿空掘巷围岩稳定性问题, 本文综合运用理论计算与数值模拟方法对留设煤柱的合理宽度及其稳定性进行研究, 并进行现场工业性试验, 检测回采期间巷道围岩变形量。研究结果表明: ① 基于极限平衡理论, 结合矿井实际地质条件, 计算得出合理的留设煤柱宽度为11 m。② 利用FLAC3D数值模拟软件, 对12411工作面回采60 m后的沿空掘巷围岩应力分布以及塑性区演化特征进行模拟分析。数值模拟结果显示, 在采动影响下, 煤柱能够有效承载围岩应力, 降低巷道变形量。③ 回采期间巷道顶板最大位移量为171 mm, 两帮最大位移量为140 mm, 巷道变形量较小, 保证了煤矿的安全开采。

关键词

采动影响, 沿空掘巷, 煤柱留设, 数值模拟

Study on the Stability of Surrounding Rock Roadway Driving along Next Goaf under Mining Impact

Dechen Lu, Min Tu, Baojie Fu, Qingchong Zhao, Lixin Hou

School of Mining Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

Received: Feb. 21st, 2025; accepted: Mar. 21st, 2025; published: May 12th, 2025

Abstract

In the process of mining, roadway driving along next goaf is widely used due to its ability to improve

文章引用: 卢德晨, 涂敏, 付宝杰, 赵庆冲, 侯李鑫. 采动影响下沿空掘巷围岩稳定性研究[J]. 矿山工程, 2025, 13(3): 465-474. DOI: 10.12677/me.2025.133051

mining efficiency and optimize ventilation systems. However, its surrounding rock stability is easily affected by mining activities, posing significant safety risks. In response to the stability problem of the surrounding rock of the 12411 working face in the Silian Second Mine, this paper comprehensively uses theoretical calculation and numerical simulation methods to study the reasonable width and stability of the reserved coal pillars, and conducts on-site industrial tests to detect the deformation of the surrounding rock of the roadway during the mining period. The research results indicate that: ① Based on the limit equilibrium theory and combined with the actual geological conditions of the mine, a reasonable width of 11 meters for retaining coal pillars is calculated. ② Using FLAC3D numerical simulation software, the stress distribution and plastic zone evolution characteristics of the surrounding rock along the goaf after 60 meters of mining in the 12411 working face are simulated and analyzed. The numerical simulation results show that under the influence of mining, coal pillars can effectively bear the stress of surrounding rock and reduce the deformation of the roadway. ③ During the mining period, the maximum displacement of the roadway roof was 171 mm, and the maximum displacement of the two sides was 140 mm. The deformation of the roadway was relatively small, ensuring the safe mining of the coal mine.

Keywords

Mining Impact, Roadway Driving along Next Goaf, Coal Pillar Retention, Numerical Simulation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着煤矿开采深度的不断增加和工作面布置方式的优化,沿空掘巷技术因其能够提高回采率、优化通风系统、减少巷道掘进工程量等优势,被广泛应用于煤矿生产。然而,沿空掘巷由于紧邻工作面,受回采过程中的采动影响较大,其围岩稳定性问题尤为突出,若控制不当,可能导致巷道变形、支护失效甚至局部坍塌,严重影响矿井的安全生产和经济效益。因此,研究沿空掘巷在采动影响下的围岩稳定性,对于优化煤柱留设宽度、提高巷道支护效果以及保障矿井安全具有重要的理论价值和工程意义。

针对综放开采煤柱护巷效果不佳、围岩变形量大、采空区侧瓦斯溢出等问题,赵洪宝等[1]以山西辛置煤矿 213B 工作面为背景,建立断层围岩弹性力学模型与断层滑移倾向评估模型,并采用 FLAC3D 数值模拟分析回采过程中断层滑移倾向的变化,确定断层失稳空间范围及强矿震的危险区。范磊等[2]针对采动巷道围岩控制的复杂性,采用破坏应力比作为围岩结构稳定性的表征参量,提出围岩非稳定状态的判定依据,并分析围岩力学性质、区域应力场、支护强度及断面形状对围岩稳定性的影响。针对双巷布置工作面两次煤柱采动影响下巷道围岩变形控制的技术难题,郭强等[3]以单侯矿 1#煤层 1105N 工作面为工程背景,通过理论计算和 FLAC3D 数值模拟分析,得出了单侯矿留设不同宽度的煤柱时 1105N 工作面进风巷围岩变形的特征,确定了双巷布置工作面区段煤柱的合理宽度,优化了 1105N 进风巷的锚杆(索)支护参数。唐忠义等[4]以高家堡煤矿盘区开采期间的微震活动、地表岩移规律及 CT 反演采动应力为分析基础,研究采动应力与构造对巷道冲击矿压发生条件的影响,并揭示巨厚覆岩关键层下冲击地压的发生机制,为冲击矿压防治提供依据。吕进国等[5]为研究采动影响下坚硬岩桥对断层活化及储能演化规律,通过理论分析探讨了含坚硬岩桥的断层活化条件。解盘石等[6]针对淋水软岩巷道在采动影响及不同支护参数条件下的破坏问题,采用物理相似模拟、数值模拟及现场实测相结合的方法,分析围岩变形破坏特

征，并优化合理的支护参数，为软岩巷道稳定性控制提供参考。李志华等[7]建立断层滑移诱发煤岩冲击的突变模型，以数值模拟研究断层滑移对顶板运动的影响，揭示冲击矿压的动态与稳态机理。研究表明，下盘向断层推进时滑移量和速度更大，冲击矿压风险更高。刘延欣等[8]以鲍店煤矿西部五采区、六采区浅部为背景，通过室内模型试验，测定不同颗粒组成和裂缝条件下的临界水力坡度，并发现采动条件下水砂突涌经历涌砂稳定、涌砂量骤减和突水三个阶段，为薄基岩区采动影响下的渗透失稳防控提供理论依据。

本文以色连二矿 12411 工作面为研究背景，基于极限平衡理论以及矿井地质条件，计算得出合理的煤柱留设宽度。随后，采用 FLAC3D 数值模拟软件，构建三维计算模型，对采动影响下的巷道围岩应力分布与塑性区演化及围岩变形规律进行深入分析。研究结果可为沿空掘巷合理布置、支护优化及矿井安全生产提供科学依据。

2. 工程概况

柱状	埋深/m	层厚/m	岩性	岩性描述
	304.64	6.48	砂质泥岩	深灰色，中厚层状，含植物化石及云母片，半坚硬，水平纹理。
	311.12	2.51	3-1 煤	深黑色，条痕褐黑色，弱沥青光泽，暗煤为主。
	313.63	15.27	砂质泥岩	灰色，中厚层状，含植物化石及炭屑，半坚硬。
	328.90	29.11	粉砂岩	灰白色，薄层状，含云母片，水平纹理，半坚硬。
	358.01	3.80	4-1煤	深黑色，暗煤为主，含亮煤条带及丝炭，半暗型煤。
	361.81	6.92	砂质泥岩	黑色，中厚层状，含植物化石及炭屑，半坚硬，夹泥岩薄层。
	368.73	6.20	细粒砂岩	灰色，中厚层状，含暗色岩屑及植物化石，半坚硬。
	374.93	8.55	粉砂岩	灰色-深灰色，水平纹理，半坚硬。
	383.48	9.39	细粒砂岩	浅灰色-灰色，厚层状，含云母片及植物化石。

Figure 1. Bar chart of working face

图 1. 工作面柱状图

12411 工作面所在的 4-1 煤层为近水平煤层，平均埋深 358 m，地质构造简单，区域内无断层，倾角在 0°~2° 之间，平均为 1°，可忽略不计，各岩层相关性质如图 1 所示。4-1 煤层上方为 3-1 煤层，平均埋深 311 m，已有 12311 和 12313 工作面开采完成，回风顺槽为实体巷道。4-1 工作面采用单一倾斜长臂区内后退式综合机械采煤法，一次采全高，顶板通过全部垮落法处理。运输顺槽作业采用沿空掘巷方式，同煤层北侧为已回采的 12412 工作面。工作面布置图如图 2 所示。

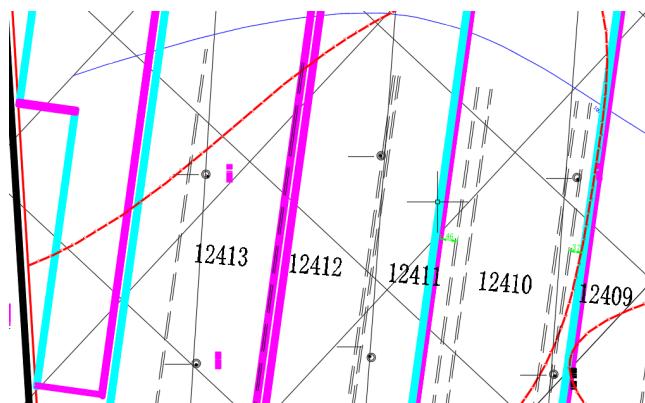


Figure 2. Layout of working face
图 2. 工作面布置图

3. 合理煤柱宽度理论计算

极限平衡理论在煤柱宽度计算中的应用, 为煤矿的设计与开采提供了理论支持。通过分析煤柱的稳定性和受力平衡, 能够为矿山提供科学的煤柱宽度计算方法, 进而保障开采过程中煤矿的安全性。

根据煤柱护巷极限平衡理论可知, 合理的煤柱宽度应满足下式:

$$B \geq M + T + X \quad (1)$$

式中: M : 锚杆的有效长度, 取 3 m。

T : 煤柱的弹性核区宽度 $T = 0.4(M + X)$ 。

X : 煤柱的塑性区宽度。

采空区侧向应力作用下煤柱塑性区宽度公式为:

$$X = \frac{h\alpha}{2\tan\theta} \ln \frac{K\gamma H + C/\tan\theta}{C/\tan\theta + P/\alpha} \quad (2)$$

式中: h 为煤层的采高, m。

α 为侧压系数。

θ 为内摩擦角, $^{\circ}$ 。

K 为应力集中系数。

γ 为岩层平均容重, kN/m^3 。

C 为煤层黏聚力, MPa。

P 为支护阻力, kN。

根据色连二矿 12411 工作面生产地质条件以及岩石力学参数测定结果可知煤层采高 h 为 2.5 m, 侧压系数 α 为 0.7, 内摩擦角 θ 为 30° , 应力集中系数 K 为 2.5, 岩层平均容重 γ 为 25 kN/m^3 , 煤层黏聚力 C 为 0.5 MPa, 支护阻力 P 为 0.5 MPa。经过计算可以得出 X 为 4.46m。把 $X = 4.46$ 带入式(1)中可得 $B \geq 10.09$ 。

综上所述, 选择 11 m 煤柱宽度应既能维持煤柱稳定性, 又能最大限度提高煤炭回采率, 从而实现资源的高效利用。

4. 沿空掘巷围岩稳定性数值模拟研究

为进一步研究留设 11 m 宽煤柱时, 受 12411 煤层采动影响下煤柱的稳定性, 利用 FLAC3D 数值模

拟软件进行模拟验证。所建模型大小为 $300\text{ m} \times 150\text{ m} \times 100\text{ m}$, 如图 3 所示。模型底部及四周固支, 限制应力及位移。模拟采用重力 $g = 9.8\text{ m/s}^2$, 根据 4-1 煤层埋深 358 m, 对模型顶部施加 8.2 MPa 的载荷。设定工作面沿 Y 轴方向推进, 分析了 12411 工作面回采 60 m 后, 超前工作面 55 m 范围内围岩应力与塑性区的演化规律。对数值计算模型进行切片处理, 得到巷道超前 5 m、15 m、30 m、45 m、55 m 时围岩应力与塑性区分布图。煤岩力学参数见表 1。

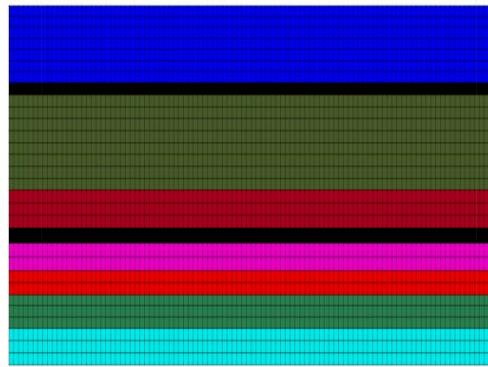
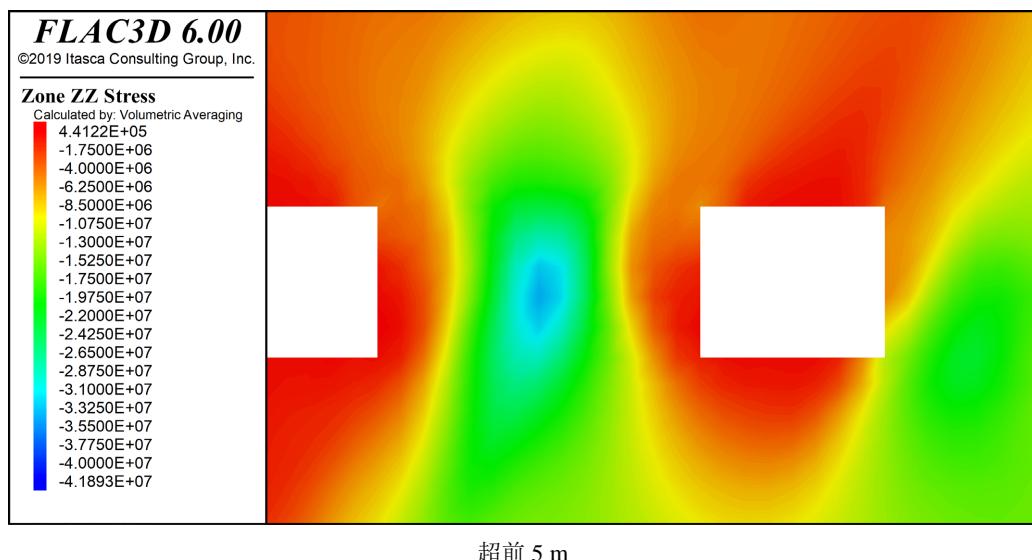


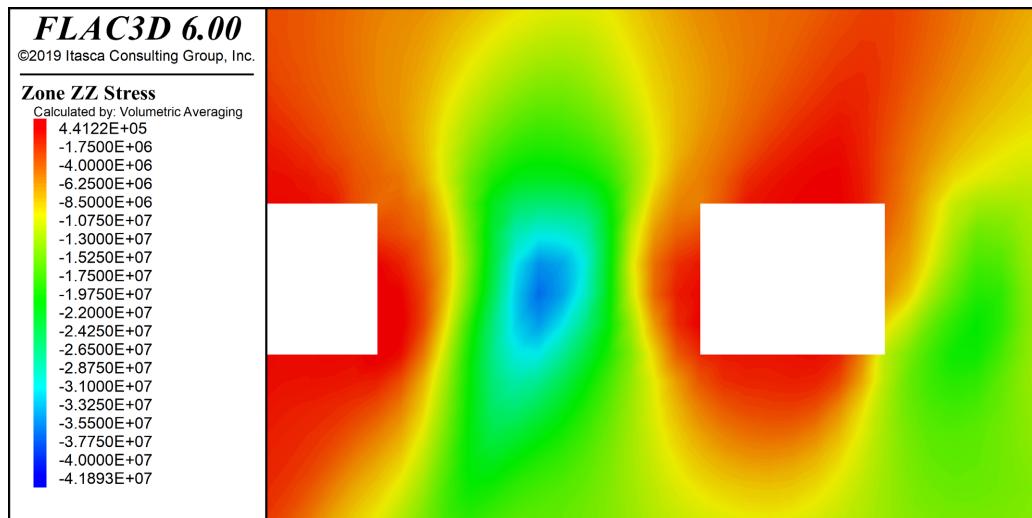
Figure 3. Numerical simulation model
图 3. 数值模拟模型

Table 1. Rock mechanics parameters
表 1. 岩层力学参数

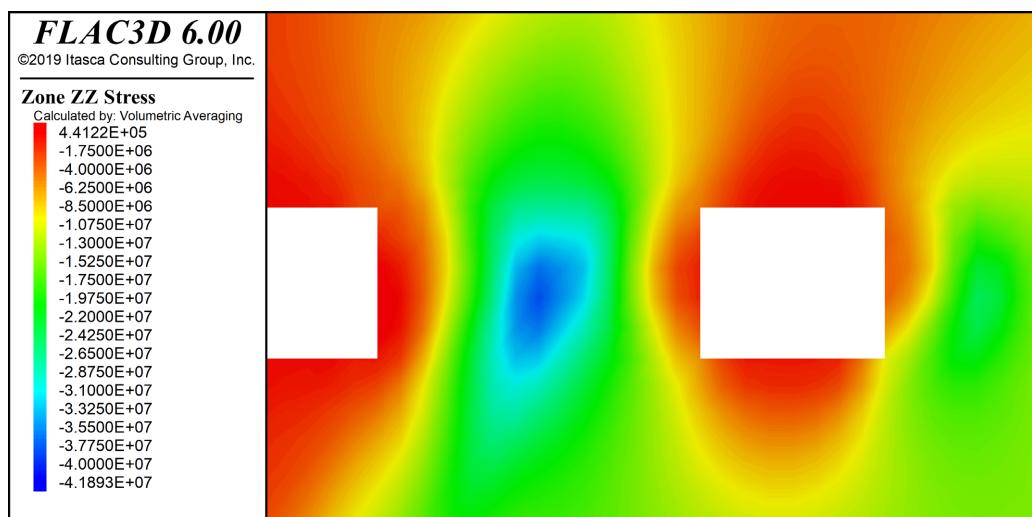
岩性	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/GPa	黏聚力/MPa	抗拉强度/MPa
煤	1346	0.8	1.5	0.5
砂质泥岩	2570	1.79	2.9	3.04
粉砂岩	2223	2.56	3.2	0.61
细粒砂岩	2196	2.71	4.6	0.21

4.1. 应力分布规律分析

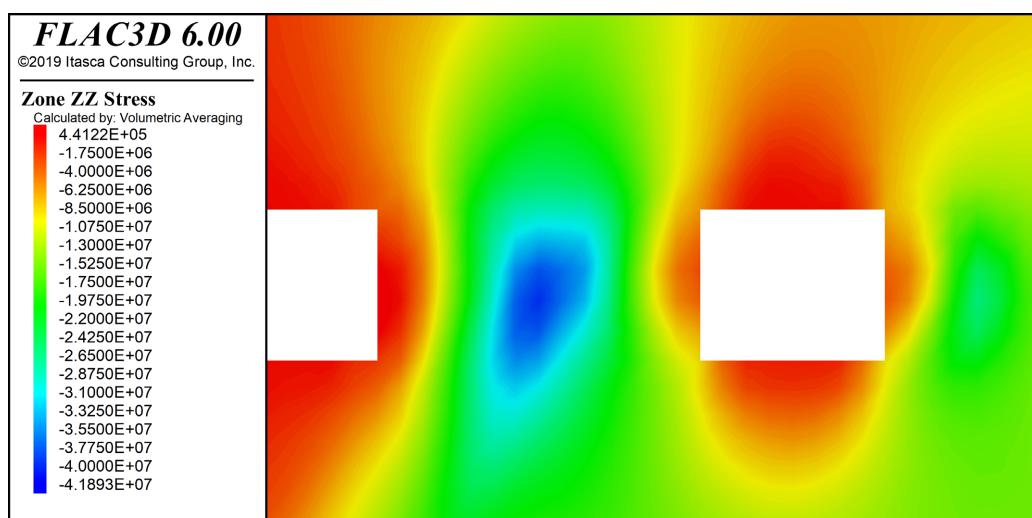




超前 15 m



超前 30 m



超前 45 m

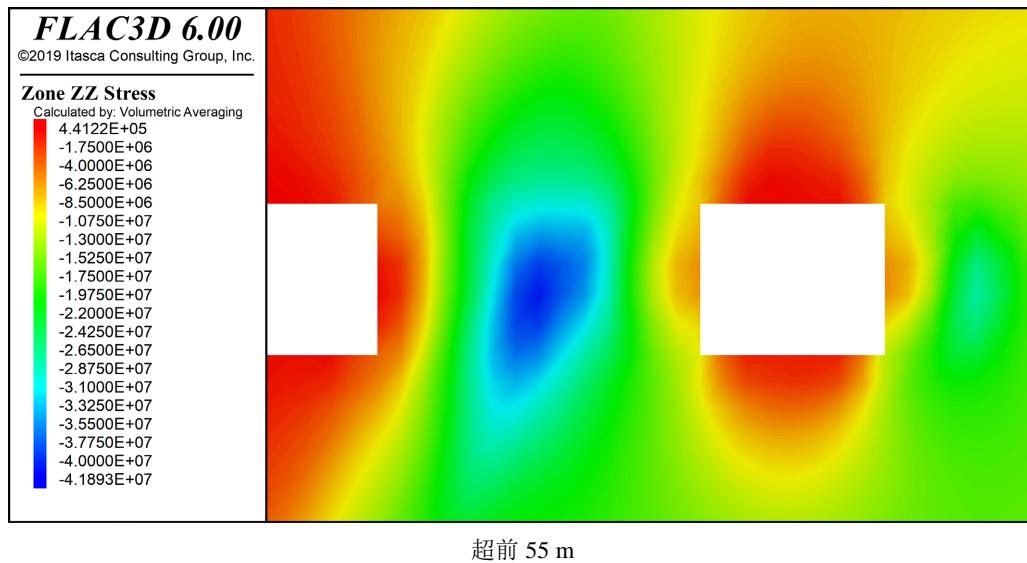
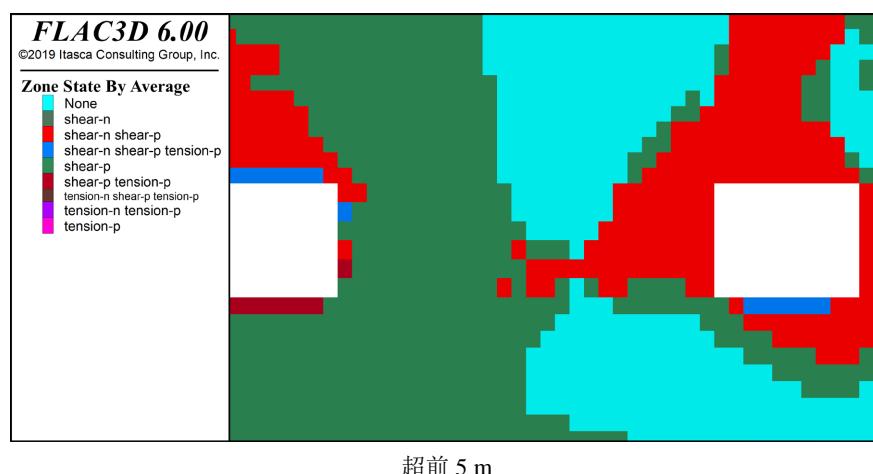


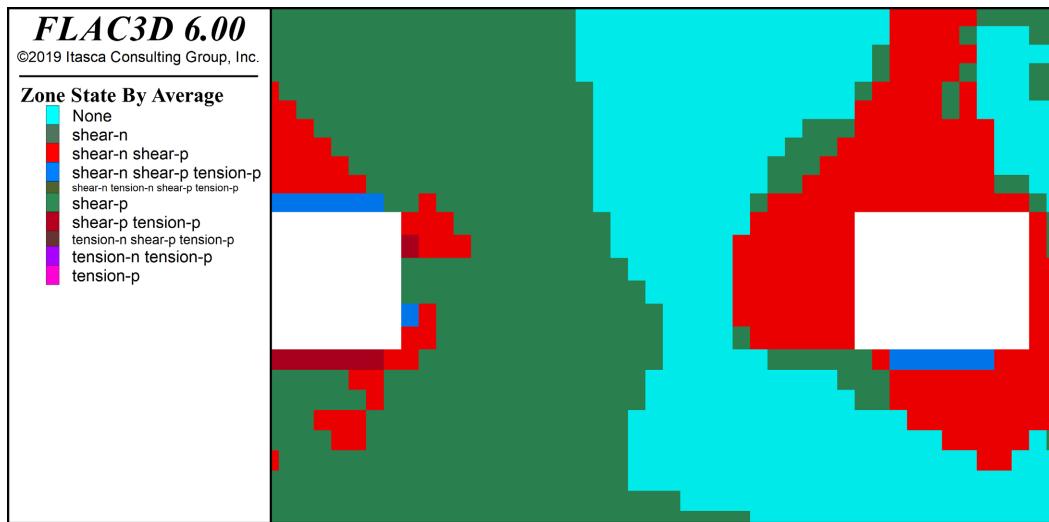
Figure 4. Stress distribution map of surrounding rock in the 55 m ahead of schedule roadway
图 4. 超前 55 m 内巷道围岩应力分布图

不同超前距离下围岩应力分布云图如图 4 所示。从图中可以看出，在采动影响下，不同超前距离处的垂直应力分布呈现明显的动态变化。超前工作面 5 m 处，煤柱内部垂直应力峰值最小，为 36.5 MPa，此时围岩受到采动扰动影响最大，煤柱承载能力最弱。随着超前工作面距离的增加(15 m、30 m)，应力调整逐渐均衡，应力集中区的范围扩大，垂直应力峰值逐渐增大，煤柱内受工作面采动影响效果显著。超前工作面 45 m 以后，应力分布基本趋于稳定，采动影响明显减弱。

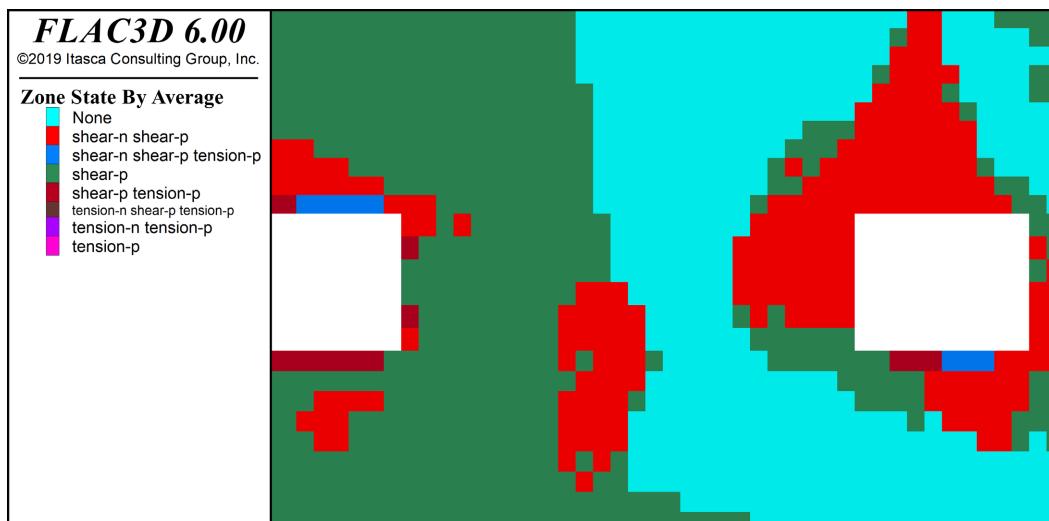
4.2. 塑性区分布规律分析

不同超前距离下围岩塑性区分布云图如图 5 所示。从图中可以看出，随着工作面的推进，采动影响逐步增强。超前工作面 45 m 至 55 m 时，塑性区主要集中在煤柱采空区侧，这一侧因采空区的应力的卸载与应力重新分布作用出现显著的剪切破坏。此时煤柱受采动影响较小，未出现显著的塑性破坏。超前工作面 30 m 至 15 m 时采动影响显著增强，煤柱左右两侧塑性区范围显著增大，中间弹性核区进一步缩小。超前工作面 5 m 时采动影响进一步增强，塑性区覆盖整个煤柱，工作面侧和采空区侧破坏贯通，煤柱失去承载能力，进入失稳状态。

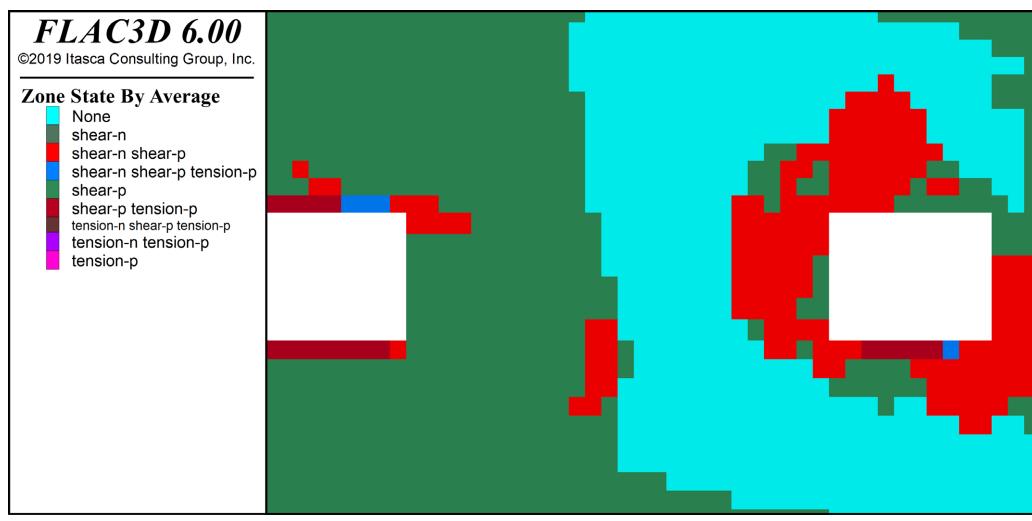




超前 15 m



超前 30 m



超前 45 m

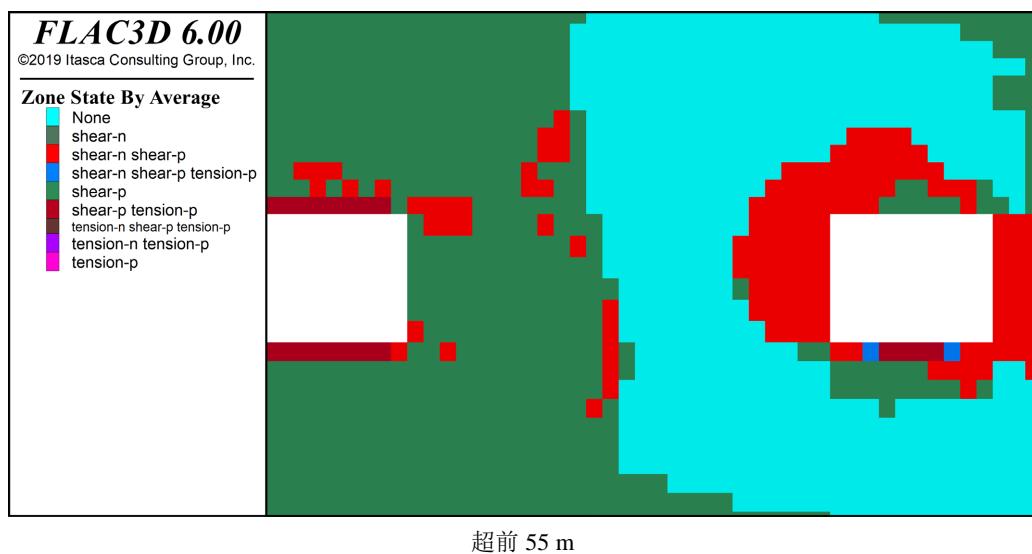


Figure 5. Distribution of plastic zone in surrounding rock of roadway within 55 m ahead of schedule
图 5. 超前 55 m 内巷道围岩塑性区分布图

5. 巷道围岩稳定性检测

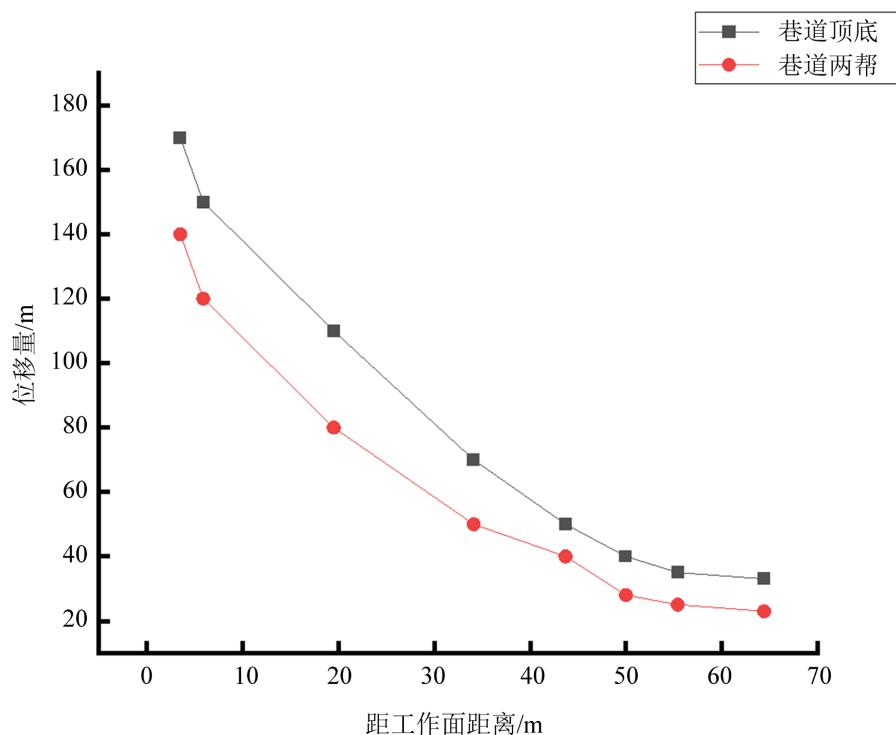


Figure 6. Deformation of surrounding rock in roadway during mining period
图 6. 回采期间巷道围岩变形量

为验证在采动影响下巷道围岩变形量,采用“十字”布点法对巷道变形进行监测。监测结果如图 6 所示,在回采期间,巷道前方 55 m 范围外围岩变形量很低且逐渐趋于稳定,受采动影响较小。而在 30 m 范围内围岩变形量较高,受采动影响较大。在距工作面 0~10 m 范围内巷道变形最为剧烈,巷道顶底位移

量最大为 171 mm, 巷道两帮位移量最大为 140 mm。在距工作面 10~30 m 范围内巷道变形量显著降低, 巷道顶底位移量最大为 137 mm, 巷道两帮位移量最大为 103 mm。在距工作面 30~50 m 范围内变形量继续降低, 巷道顶底位移量最大为 78 mm, 巷道两帮位移量最大为 56 mm, 表明巷道变形逐渐趋于稳定。回采期间巷道顶底最大位移量为 171 mm, 两帮最大位移量在 140 mm, 巷道顶底以及两帮变形量皆在可控范围内。井下巷道实际应用效果如图 7 所示。



Figure 7. Application effect of underground roadway
图 7. 井下巷道应用效果

6. 结论

(1) 研究采用极限平衡理论, 并结合 FLAC3D 数值模拟方法得出合理的留设煤柱宽度为 11 m。对 12411 工作面回采 60 m 后的沿空掘巷围岩应力分布与塑性区演化及变形特征进行分析。模拟结果表明, 煤柱在采动影响下能够有效承载围岩应力, 降低巷道变形量, 提高巷道稳定性。

(2) 现场工业试验监测结果表明, 回采期间巷道顶板最大位移量为 171 mm, 两帮最大位移量为 140 mm, 整体变形较小, 符合工程安全要求。研究表明, 通过合理确定煤柱宽度, 可以有效控制巷道变形, 确保煤矿安全开采, 为沿空掘巷工程的设计与应用提供了理论和实践支撑。

参考文献

- [1] 赵洪宝, 张博, 张弛, 等. 采动诱发断层滑移评估模型及失稳范围确定方法[J]. 煤田地质与勘探, 2025, 53(3): 23-33.
- [2] 范磊, 常聚才, 王卫军, 袁超, 吴海, 齐潮. 采动巷道围岩结构稳定性影响因素及演化规律研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2024, 42(2): 356-370.
- [3] 郭强, 王萌. 动压影响下双巷布置工作面区段煤柱合理宽度研究[J]. 煤炭工程, 2021, 53(12): 97-102.
- [4] 唐忠义, 王睿智, 王桂峰, 等. 巨厚覆岩诱导的采动效应及冲击地压发生机制[J]. 采矿与安全工程学报, 2025(1): 108-117.
- [5] 吕进国, 韩文鹤, 张学朋, 等. 采动影响下坚硬岩桥型断层活化与储能演变规律研究[J]. 煤炭学报, 2025, 50(2): 902-916.
- [6] 解盘石, 房嘉睿, 胡博胜, 等. 采动下淋水软岩巷道围岩变形破坏特征[J]. 工矿自动化, 2024, 50(12): 27-35, 92.
- [7] 李志华, 窦林名, 曹安业, 等. 采动影响下断层滑移诱发煤岩冲击机理[J]. 煤炭学报, 2011(S1): 68-73.
- [8] 刘延欣, 武宇亮, 康方, 等. 薄基岩区采动厚松散层底部土体渗透破坏特征研究[J]. 煤矿安全, 2025, 56(2): 203-211.