

综采工作面过不同层位空巷围岩移动变形规律研究

李文华, 杨继恒

宁夏红墩子煤业有限公司红一煤矿, 宁夏 银川

收稿日期: 2025年7月20日; 录用日期: 2025年8月23日; 发布日期: 2025年9月11日

摘要

针对工作面过不同层位空巷造成围岩变形及应力扰动等问题, 以宁夏某矿的综采工作面为工程背景, 采用模拟分析方法来确定工作面过不同层位巷道围岩变形规律, 并根据工作面空巷实际分布情况, 采用Flac3D建立数值模型, 分析工作面推进过程中空巷的围岩变形、应力分布及塑性破坏特征, 对不同层位条件下工作面过空巷提出相应措施, 为综采工作面安全高效过空巷提供重要参考。

关键词

空巷, 不同层位, 数值模拟, 围岩移动规律

Research on the Movement and Deformation Law of the Surrounding Rock of the Comprehensive Mining Working Face over Different Layers of Empty Tunnel

Wenhua Li, Jiheng Yang

Hongyi Coal Mine, Ningxia Hongdunzi Coal Industry Co., Ltd., Yinchuan Ningxia

Received: Jul. 20th, 2025; accepted: Aug. 23rd, 2025; published: Sep. 11th, 2025

Abstract

In order to solve the problems of surrounding rock deformation and stress disturbance caused by the working face passing through different layers of empty alleys, we take the comprehensive

文章引用: 李文华, 杨继恒. 综采工作面过不同层位空巷围岩移动变形规律研究[J]. 矿山工程, 2025, 13(5): 958-967.

DOI: 10.12677/me.2025.135109

mining face of a mine in Ningxia as the engineering background, use the simulation analysis method to determine the deformation law of the surrounding rock of the roadway of the working face passing through different layers, and according to the actual distribution of the empty alleys of the working face, we use Flac3D to establish the numerical model to analyze the deformation of the surrounding rock of the empty alleys, the distribution of the stresses and the characteristics of the plastic damage in the process of the advancing of the working face. The characteristics of deformation, stress distribution and plastic damage are analyzed, and corresponding measures are proposed for the working face to pass through the empty tunnel under different layer conditions, which will provide an important reference for the safe and efficient passing through the empty tunnel in the comprehensive mining face.

Keywords

Empty Tunnel, Different Layers, Numerical Simulation, Movement Law of Surrounding Rock

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

煤炭作为我国主体能源,在国家发展建设的过程中具有重要的战略地位。但随着时间推移,由于早期对煤炭资源的探明与开采技术的不成熟,造成井下工作面无序性开采与巷道不合理布置的问题。不仅严重浪费煤炭资源,还会使新工作面推进过程中受临近空巷应力扰动影响[1],很大程度上限制开采的连续性,降低开采效率[2]。故此,在井下开采的诸多安全问题中,工作面过空巷已经成为了矿井安全问题的重要研究领域之一。

随着工作面过空巷的隐患不断增加,为有效解决过空巷的安全、工作效率以及开采技术等问题,诸多学者对空巷的围岩变形以及应力分布展开了大量研究[3]-[6]。研究者[7]选用相关矿井为研究背景,运用力学分析、数值模拟、现场实测等方法,分析了工作面推过空巷时的应力分布规律,依据相关理论建立力学模型,提出有效的支护手段。研究者[8]依据工程实况建立了工作面所遇空巷的基本顶板力学模型,根据工作面实际条件计算了充填体的最低有效支护强度;研究者[9]利用突变理论从势能积聚的角度,对工作面推进过程中与空巷间距对二者之间煤柱破坏失稳机理进行了研究,根据煤体破坏区域及应力形变分布预测工作面来压情况。上述研究为综采工作面过空行巷的围岩变形及应力分布规律等提供了扎实的理论基础,且多数研究针对实际矿井问题提出了合理的支护方式[10]-[13]。现有的研究内容对于工作面过不同层位空巷的围岩变形移动规律研究理论较少,无法针对工作面过不同层位空巷时的围岩变形控制做出精准预判。

本文以宁夏某矿的综采工作面为工程背景,采用模拟分析方法来确定工作面过不同层位巷道围岩变形规律,并根据工作面空巷实际分布情况,采用 Flac3D 建立数值模型,分析工作面推进过程中空巷的围岩变形、应力分布及塑性破坏特征,为综采工作面安全高效过空巷提供重要参考。

2. 工程概况及数值模拟方案

2.1. 矿井概况

本研究主要针对宁夏某矿 1150403 综采工作面上、下层巷道的围岩变形问题展开分析。该工作面走

向长度 1738 m, 平均倾向长度 246.4 m。该区域 4 煤层结构简单, 煤层厚度 3.4~3.1 m, 平均 3.24 m; 为较稳定煤层, 煤层倾角 1~8°, 平均倾角为 4°。

工作面回采过程中, 会遇到位于工作面上层、下层的 6 条巷道, 上层三条空巷道距工作面顶部距离分别为 3.4 m、5.21 m、10.2 m, 下层空巷距离煤层底板距离为 3.22 m、5.12 m 以及 9.58 m。不同层位空巷数量较多, 严重制约工作面开采的有序性、效率性以及安全性。

2.2. 数值模型及模拟方案

2.2.1. 数值模型

建立长 300 m × 宽 100 m × 高 120 m 的数值模拟力学模型, 选取工作面推进方向为 x 轴, 垂直方向为 z 轴, 模型计算采用摩尔 - 库伦准则, 顶部施加等效于上覆岩层自重的均布载荷 4 MPa, 模型底边固定垂直位移, 两边固定水平位移。根据工作面地质钻孔, 提取出模拟工作面的相关岩层力学参数, 具体地层力学参数见表 1, 并建立实际数值模拟模型如图 1 所示。

Table 1. Petrophysical-mechanical parameters of the modeled layers

表 1. 模型各层的岩石物理力学参数

序号	名称	厚度/m	密度/(kg·m ⁻³)	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(o)	抗拉强度/MPa
1	泥岩	4	2600	0.78	0.44	1.42	37	1.32
2	细砂岩	6	2600	0.78	0.44	1.42	37	1.32
3	粉砂岩	6	2600	0.88	0.62	1.25	40	0.20
4	泥岩	5	2600	0.84	0.56	1.28	39	0.50
5	细砂岩	6	2600	0.88	0.62	1.28	40	0.50
6	粉砂岩	5	1380	0.92	1.18	1.41	39	1.09
7	粉砂岩	14	2600	1.80	1.26	2.62	40	1.00
8	煤	3	1380	0.92	1.18	1.41	39	1.09
9	细砂岩	14	2600	2.09	1.36	3.17	39	1.23
10	泥岩	5	2600	1.89	1.32	2.75	40	1.05
11	石灰岩	8	2600	1.89	1.32	2.75	40	1.05

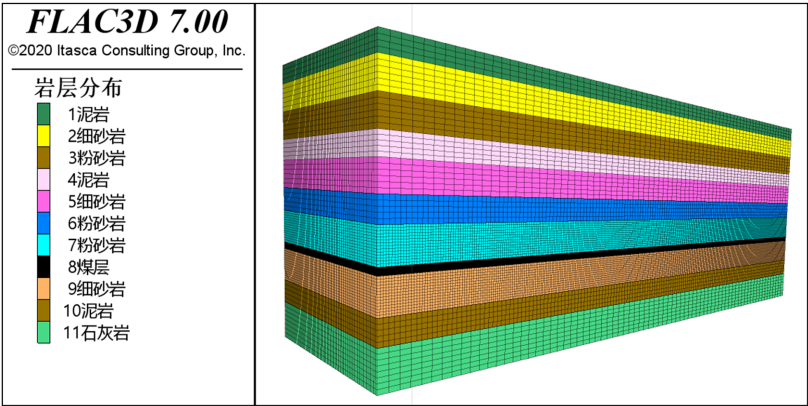


Figure 1. Numerical simulation model
图 1. 数值模拟模型

2.2.2. 模拟方案

根据各穿层巷道的空间分布特征,对空巷的空间布置进行简化,确定6种不同层位的空巷进行布置,具体研究方案见表2,模拟布置图如图2所示。利用数值模拟研究综采面与空巷不同层位布置三维模型,空巷位于煤层上方或下方,均位于 $x = 150\text{ m}$ 处,分别在综采工作面采空区距离空巷20 m、10 m、2 m时,研究空巷不同层位布置时工作面推进过程中综采工作面与空巷塑性区、围岩位移、应力演化的“三场”空间展布规律。

Table 2. Simulation scheme for different empty tunnel levels

表 2. 不同空巷层位模拟方案

方案	形状	尺寸	层位
1	矩形	5 m × 3 m (底 × 高)	空巷位于工作面上方 3 m
2			空巷位于工作面下方 3 m
3			空巷位于工作面上方 5 m
4			空巷位于工作面下方 5 m
5			空巷位于工作面上方 10 m
6			空巷位于工作面下方 10 m

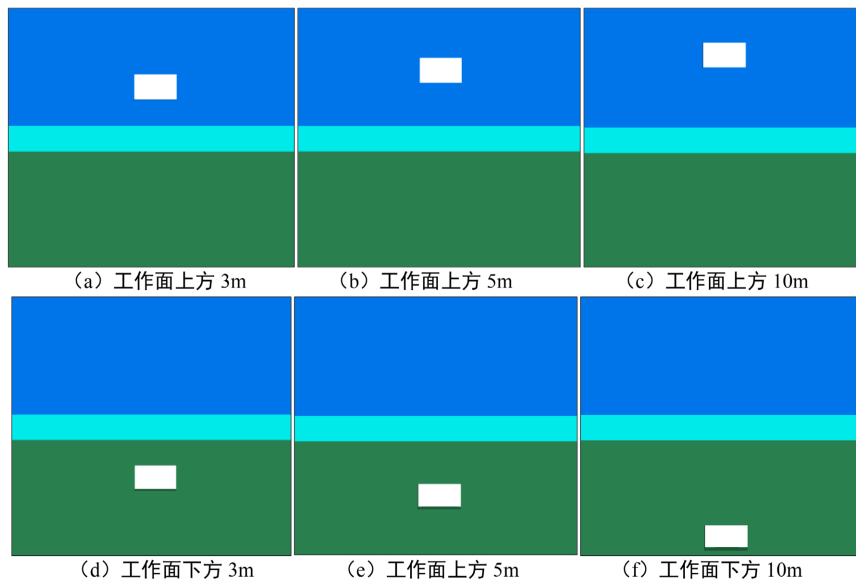


Figure 2. Simulated layout

图 2. 模拟布置图

3. 模拟结果及分析

通过数值模拟研究空巷不同层位条件下,研究推进80 m、90 m、98 m(即采空区与空巷侧帮的水平间距分别为20 m、10 m、2 m)过程中空巷变形规律、应力分布及破坏特性,在每一巷道布置测点监测左帮水平位移及上帮垂直位移,将数据导入到origin中处理得到双y轴曲线,其中x轴为巷道相对位置,如位于工作面上方3 m的巷道中,垂直位移对应顶板150~155 m处,水平位移对于46~49 m处。

3.1. 不同层位空巷变形规律

其中不同层位空巷推进过程变形规律如图3所示,不同层位空巷推进过程变形曲线如图4所示。

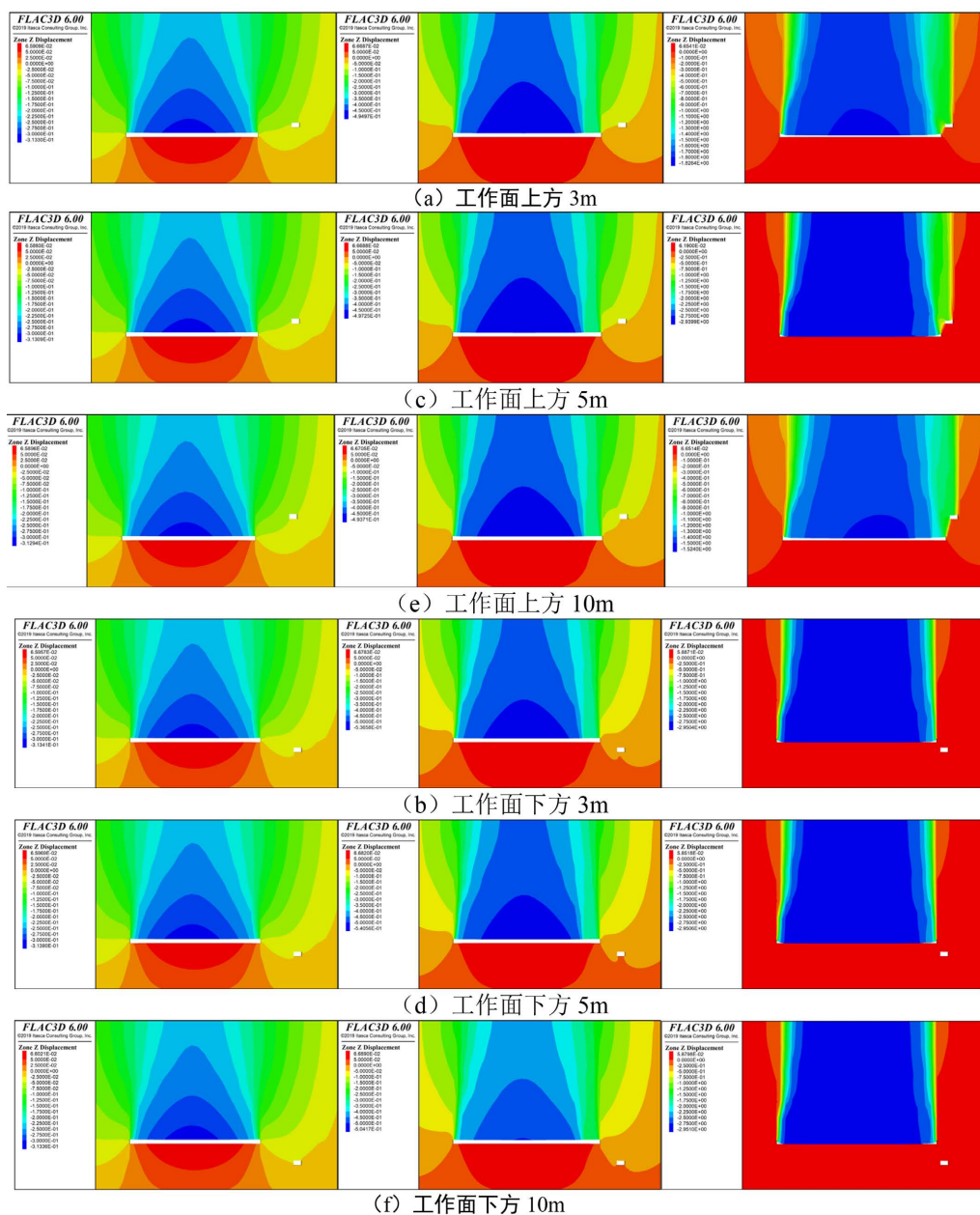


Figure 3. Deformation law of different layers of empty tunnel advancing process

图 3. 不同层位空巷推进过程变形规律

● 由图 3、图 4 分析可知:

● 巷道变形主要发生在顶板及靠近采空区侧的左帮中, 随着推进距离的增大, 空巷与采空区之间的煤柱宽度逐渐减小, 受采动影响增大, 支撑作用减小, 巷道变形随之增大, 其中空巷位于工作面上方 5 m 时巷道变形最大, 空巷位于工作面下方 10 m 时巷道变形最小;

● 在推进 80 m、90 m 时巷道变形相对较小, 但巷道位于工作面上方比位于工作面下方时变形较大; 当空巷位于工作面上方 3 m、5 m、10 m, 且在推进 90 m 时最大垂直位移均约在 9~10 cm 区间内, 变形不大且相差较小, 最大水平位移均约在 4.5 cm 左右, 平均比垂直变形小; 当空巷位于工作面下方 3 m、5 m、10 m, 且在推进 90 m 时最大垂直位移均约在 4~5 cm 区间内, 变形不大且相差较小, 最大水平位移

均约在 1.6~3.5 cm 左右, 平均均比垂直变形小;

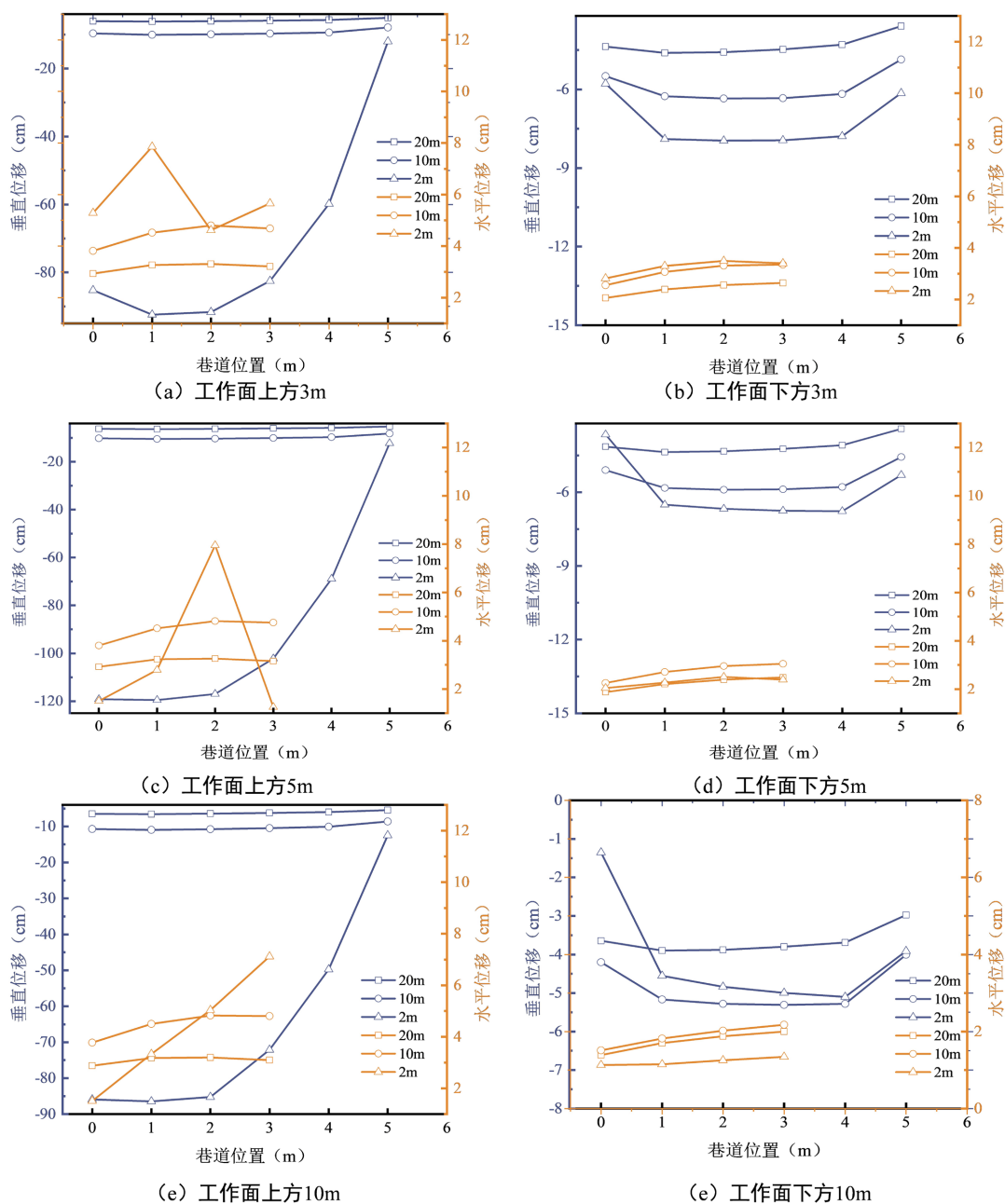


Figure 4. Deformation curve of different layers of empty tunnel advancing process

图 4. 不同层位空巷推进过程变形曲线

● 在推进 98 m 时由于采空区与空巷间煤柱宽度较小, 因此空巷变形明显变大, 其中当空巷位于工作面上方 3 m、5 m、10 m 时, 三个层位巷道的变化趋势大致相同, 顶板最大垂直位移分别约为 92 cm、119 cm、86 cm, 最大值基本都出现在空巷左上角, 左帮最大水平位移分别为 7.8 cm、7.9 cm、7.1 cm, 最大值基本都出现在空巷左帮中间位置; 当空巷位于工作面下方 3 m、5 m、10 m 时, 三个层位巷道的变化趋势基本一致, 顶板最大垂直位移分别约为 7.8 cm、6.7 cm、5.0 cm, 最大值基本都出现在空巷中部位置,

左帮最大水平位移分别为 3.5 cm、2.5 cm、1.3 cm，最大值基本都出现在空巷左帮中下位置；

● 综上所述，空巷位于工作面下方 10 m 时巷道垂直及水平变形最小，空巷位于工作面上方 5 m 时巷道垂直及水平变形最大，空巷位于工作面上方时巷道变形较为明显，但随着层位的上升巷道变形增加后出现降低趋势，说明位于工作面上方一定距离层位的空巷受工作面掘进影响较大。

3.2. 不同层位空巷应力分布

不同层位空巷推进过程应力分布如图 5 所示，不同层位空巷推进过程应力曲线如图 6 所示。

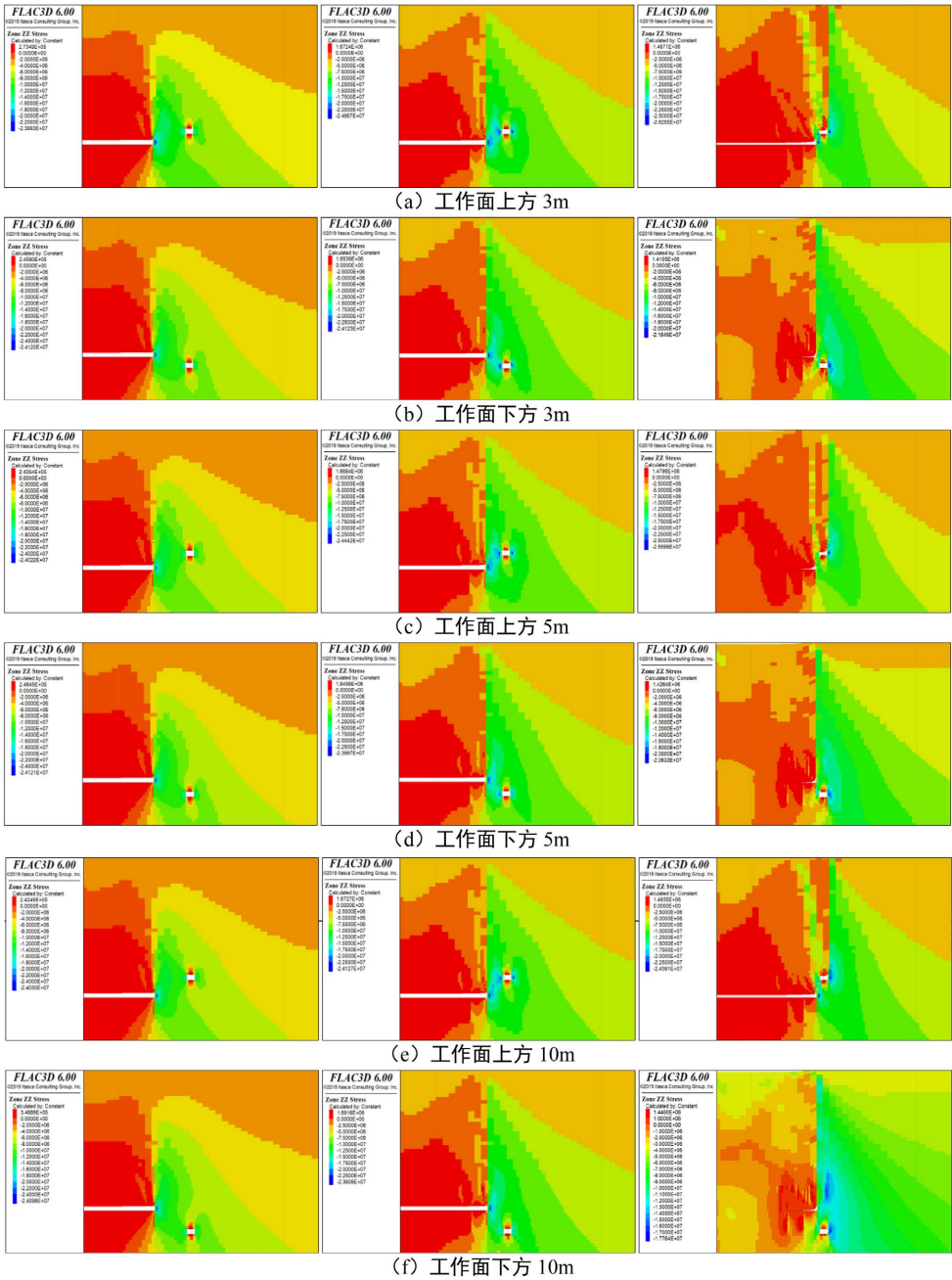


Figure 5. Stress distribution during the advancement of an empty tunnel at different levels
图 5. 不同层位空巷推进过程应力分布

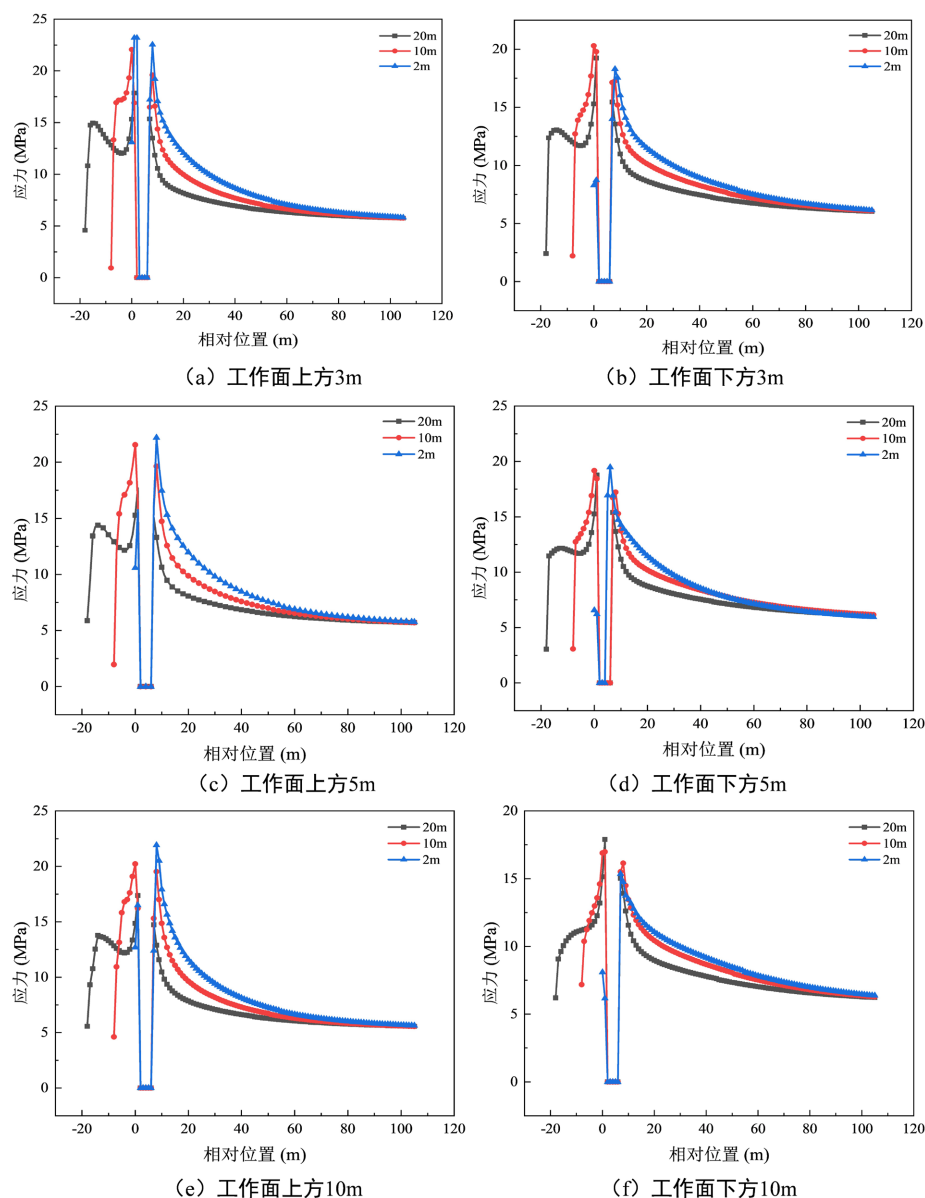


Figure 6. Stress curves during the advancement of air shafts at different levels

图 6. 不同层位空巷推进过程应力曲线

- 由图 5、图 6 分析可知：
- 随着工作面推进，煤柱宽度的减小，受采动影响采空区与空巷间集中应力越明显，同时超前集中应力相对也更明显；
- 不同层位空巷下，推进 80 m、90 m 时煤柱间最大集中应力相差较小，但巷道位于工作面上方与位于工作面下方相比最大集中应力较高，分别约为 22.5 MPa 和 20.05 MPa，随着推进距离的增大，峰值也越靠近空巷，而随着推进距离的增大，其空巷超前应力峰值也随之增大，变化趋势大致均相同，峰值后超前应力逐渐降低，最后趋于原岩应力；
- 在推进 98 m 即采空区与空巷间煤柱宽度为 2 m 时，空巷位于工作面上方 3 m、5 m、10 m 的超前应力峰值均约为 23 MPa，而空巷位于工作面下方 3 m、5 m、10 m 的超前应力峰值均约为 19 MPa，可以

看位于工作面下方的空巷超前应力相对较小, 但各层位煤柱间集中应力及超前应力变化趋势大致相同。

3.3. 不同层位空巷破坏特征

不同层位空巷推进过程破坏特征如图 7 所示。

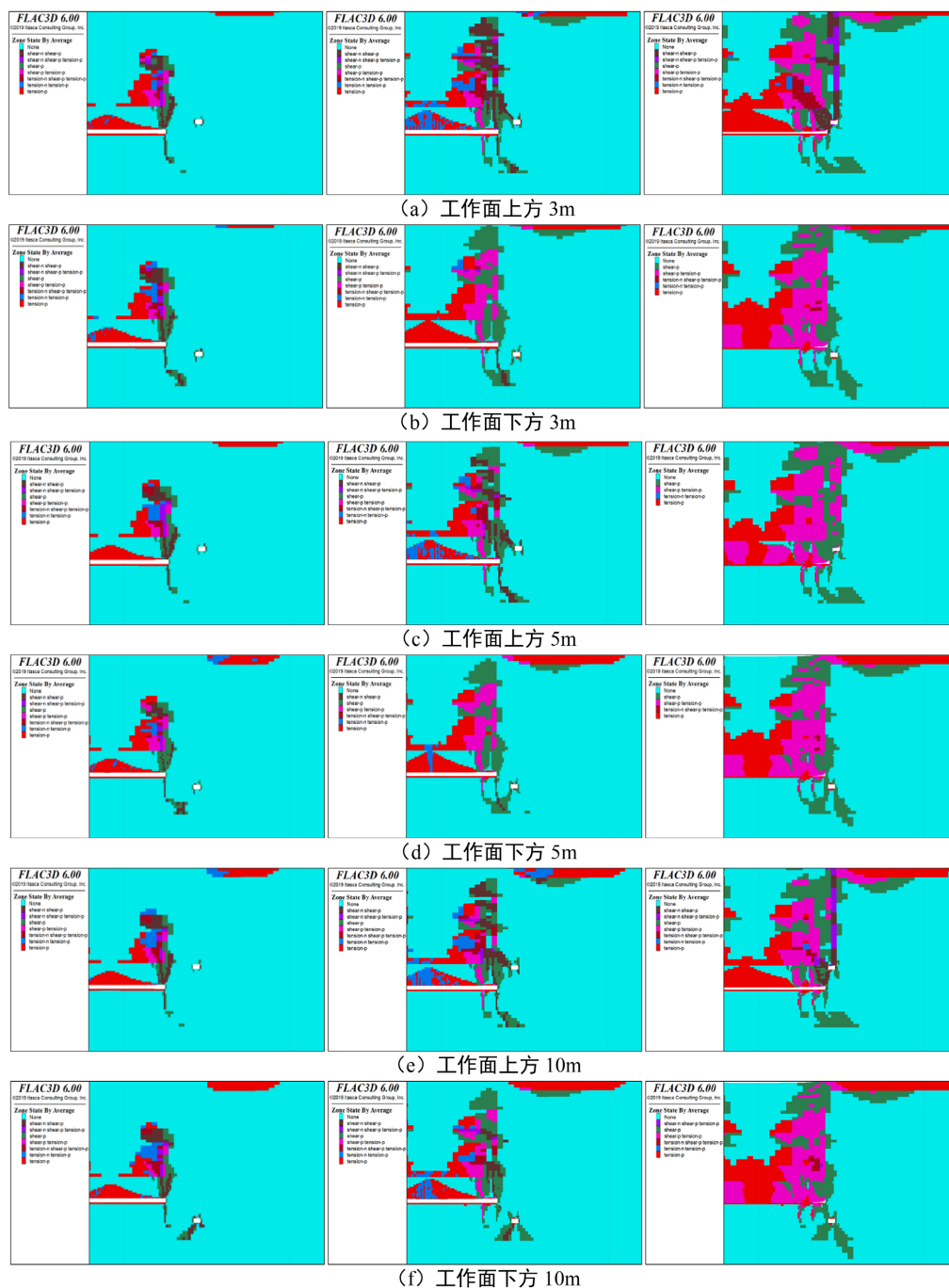


Figure 7. Characteristics of damage during the propulsion process of empty alleys at different levels

图 7. 不同层位空巷推进过程破坏特征

在工作面推进 80 m 时, 由于煤柱宽度较大, 受到采动影响较小, 因此空巷周围破坏较小, 几乎无破

坏;工作面推进 90 m 时,空巷附近塑性区面积进一步增大,位于工作面上方的空巷塑性区均与工作面采空区联通,破坏相对较大,而工作面下方的空巷塑性区发育面积相对较小;工作面推进 98 m 时,塑性区发育完整,空巷已完全破坏,主要体现为剪切破坏位,位于工作面上方的空巷塑性区发育面积较大,而位于工作面下方的空巷塑性区发育面积较小,破坏程度较低。

4. 结论

本研究通过研究综采工作面过不同层位巷道围岩变形规律,得出以下结论:

(1) 工作面推过空巷时,巷道变形主要发生在顶板及靠近采空区侧的左帮中部位置,且相较于工作面下方巷道,空巷位于工作面上方时巷道变形较为明显,但随着层位的上升巷道变形增加后出现降低趋势,故工作面推进过程中,应对上层空巷的中部位置提前进行支护防控。

(2) 随着工作面推进,巷道位于工作面上方与位于工作面下方相比最大集中应力较高,且空巷超前应力峰值也随推进距离增大,最后趋于原岩应力;故此,当工作面通过上层空巷时,提前做好工作面前方的卸压工作,降低上层空巷引起的集中应力。

(3) 位于工作面上方的空巷塑性区均与工作面采空区联通,破坏相对较大,而工作面下方的空巷塑性区发育面积相对较小。故此,在工作面通过上层巷道时,提前布置防渗等工作,防止因空巷塑性破坏区域与采空区导通引发渗流等事故的发生。

参考文献

- [1] 钱鸣高,石平五. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州:中国矿业大学出版社,2003: 87-92.
- [2] 郑文翔. 长壁工作面过空巷顶板稳定性动态特征研究[J]. 煤矿安全, 2014, 45(4): 51-53, 57.
- [3] 段春生. 综采工作面过空巷支护实践研究[J]. 煤炭工程, 2010(5): 37-39.
- [4] 柏建彪,侯朝炯. 空巷顶板稳定性原理及支护技术研究[J]. 煤炭学报, 2005(1): 8-11.
- [5] 何向宁,陈勇,秦征远. 综放工作面过空巷技术研究及应用[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(6): 124-130.
- [6] 王庆雄,王巍,魏光荣,王志峰,胡建平. 哈拉沟煤矿特殊采掘条件顶板管控技术[J]. 煤炭工程, 2020, 52(11): 57-63.
- [7] 李杨,朱恩光,张康宁,齐北荻,苏继敏,曹鹏,曹敏,李承昆,王家兴,王铮. 工作面过破坏区开采方法与覆岩破断规律研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(S1): 16-23.
- [8] 杜克辉,乔梁. 综采工作面分段充填过空巷技术研究[J]. 煤炭技术, 2023, 42(9): 59-63.
- [9] 王萌. 放顶煤工作面过空巷高水材料充填技术研究[J]. 煤炭工程, 2019, 51(3): 60-64.
- [10] 张国恩,赵建明,胡江,刘虎生. 乌兰木伦煤矿综采面过空巷泵送支柱支护技术研究[J]. 煤炭工程, 2019, 51(8): 35-38.
- [11] 张国恩,解振华,史洪恺. 过空巷群支护技术与矿压显现规律特征分析[J]. 煤矿安全, 2020, 51(11): 248-252.
- [12] 王炜. 高水材料充填支柱在大采高工作面过空巷中的应用[J]. 煤炭工程, 2020, 52(5): 67-70.
- [13] 尹超宇,冯光明,高鹏等. 工作面过空巷围岩失稳机理研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2018, 35(3): 457-464.