

倾斜煤层开采底板破坏特征演化分析

许明镜, 张晨亮, 姚彬, 薛俊辰

河北工程大学地球科学与工程学院, 河北 邯郸

收稿日期: 2025年11月21日; 录用日期: 2025年12月16日; 发布日期: 2025年12月24日

摘要

针对倾斜煤层开采过程中底板破坏特征及演化规律, 本文以羊东矿8469工作面为工程背景, 结合理论分析与FLAC3D数值模拟方法, 系统研究了采动应力场作用下底板破坏深度的动态演化特征。研究结果表明: 倾斜煤层开采后支承压力呈“马鞍形”非对称分布, 底板因应力分解形成滑移破坏带, 理论公式计算最大破坏深度为29.2 m; 数值模拟显示, 随工作面推进至255 m时, 底板破坏深度稳定于28.75 m, 塑性区形态呈“勺型”, 以拉张破坏为主, 两侧因应力集中发生剪切破坏。研究揭示了煤层倾角与埋深对底板破坏的耦合影响规律, 为深部倾斜煤层安全开采及防治水工程设计提供了理论依据。

关键词

倾斜煤层, 底板破坏深度, FLAC3D, 数值模拟

Analysis of the Evolution of Floor Failure Characteristics in Inclined Coal Seam Mining

Mingjing Xu, Chenliang Zhang, Bin Yao, Junchen Xue

School of Earth Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan Hebei

Received: November 21, 2025; accepted: December 16, 2025; published: December 24, 2025

Abstract

This paper focuses on the floor failure characteristics and evolution laws during the mining of inclined coal seams. Taking the 8469 working face of Yangdong Mine as the engineering background, theoretical analysis and FLAC3D numerical simulation methods are combined to systematically study the dynamic evolution characteristics of floor failure depth under the action of mining-induced stress field. The research results show that after the mining of inclined coal seams, the

supporting pressure presents a “saddle-shaped” asymmetric distribution. A slip failure zone is formed in the floor due to stress decomposition, and the maximum failure depth calculated by the theoretical formula is 29.2 m. The numerical simulation results show that when the working face advances to 255 m, the floor failure depth stabilizes at 28.75 m. The plastic zone presents a “spoon-shaped” morphology, with tensile failure as the main form, and shear failure occurs on both sides due to stress concentration. The study reveals the coupling influence law of coal seam dip angle and burial depth on floor failure, which provides a theoretical basis for the safe mining of deep inclined coal seams and the design of water control engineering.

Keywords

Inclined Coal Seam, Floor Failure Depth, FLAC3D, 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

中国经济的迅速增长很大程度上与煤炭资源的需求密切相关, 煤炭在我国能源消费结构中依然占有很大比重[1]-[3]。目前, 我国煤炭开采逐步由浅部煤炭开采向深部煤炭开采发展[4] [5], 倾斜煤层开采是我国深部煤炭资源开发的重要技术方向, 其复杂的应力分布特征及底板破坏演化规律对煤炭的安全开采与突水防治提出了严峻挑战[6] [7]。相较于水平煤层, 倾斜煤层开采过程中支承压力呈现显著的非对称分布, 导致底板岩层在采动应力场作用下发生滑移破坏, 形成独特的“勺型”塑性区结构。这一破坏机制不仅影响工作面围岩稳定性, 更直接威胁矿井防治水工程的可靠性[8]-[12]。然而, 现有研究多聚焦于水平或近水平煤层底板破坏深度预测, 对倾斜煤层采动应力场与底板破坏特征的动态耦合机制缺乏系统分析, 尤其针对煤层倾角与埋深的协同效应尚未形成普适性理论模型。

近年来, 数值模拟技术为揭示复杂地质条件下岩层破坏机理提供了有效手段。FLAC3D 凭借其在非线性力学行为与大变形模拟分析能力的优势, 逐渐成为采矿工程稳定性评估的重要工具。然而, 如何构建符合倾斜煤层地质力学特征的数值模型, 并实现采动应力场与底板破坏深度的动态关联, 仍是亟待解决的关键问题[13]。

基于此, 本文以羊东矿 8469 工作面为工程背景, 综合理论分析与 FLAC3D 数值模拟方法, 系统研究倾斜煤层开采过程中底板破坏深度的动态演化规律。通过构建理论模型, 揭示支承压力非对称分布与底板滑移破坏的耦合机制; 结合 FLAC3D 数值模拟, 量化不同开采阶段底板塑性区的空间扩展特征, 阐明“勺型”破坏结构的形成机理。研究成果可为深部倾斜煤层安全开采及底板突水防控提供理论支撑, 同时对优化采场支护设计具有重要工程参考价值。

2. 工程背景概况

作为峰峰集团有限公司的核心煤炭开采区域之一, 羊东矿在煤炭生产中占据重要地位。其中, 8469 工作面隶属于五二采区, 开采作业在-850 m 水平进行, 目标层为下部的野青煤层(4#煤)。该工作面走向长度 1100 m, 倾向长度为 160 m, 煤层埋藏深度约为 700 m。野青煤层(4#煤)在区域内呈现稳定的分布特征, 该煤层具备良好的工业开采价值, 其地质赋存呈现显著均质化特征。煤岩层厚度分布区间介于 0.8~1.42 m, 平均厚度 1.2 m, 符合中厚煤层分类标准。地层产状方面, 实测倾角值域为 2°~12°, 经统计分析确定

主控倾角为 10° ，整体呈现缓倾斜煤层特性。针对该煤层的工程地质条件，开采系统设计采用长壁综采全厚开采工艺，配套实施垮落式顶板管理技术，通过矿压显现规律调控实现采空区高效处理。各含水层基本特征如表 1 所示。

Table 1. Basic characteristics of each aquifer
表 1. 各含水层基本特征表

含水层名称	厚度(m)	富水性
第四系孔隙含水层	6.6~2.6	中等
石盒子组砂岩裂隙含水层	15	中等 - 弱
山西组砂岩裂隙含水层	$\frac{10\sim20}{11}$	弱
野青灰岩裂隙含水层	$\frac{0\sim3.43}{1.3}$	弱
伏青灰岩裂隙含水层	$\frac{2.51\sim5.0}{3.5}$	弱
小青灰岩裂隙含水层	$\frac{0.3\sim2.09}{0.8}$	弱
大青灰岩岩溶裂隙含水层	$\frac{4.4\sim7.27}{5.5}$	中等 - 弱
奥陶系灰岩岩溶裂隙含水层	605	极强、不均一

3. 理论分析

相关研究证实，煤矿采空区邻近岩层在开采作业终止后会诱发显著的应力集中现象。相较于其他煤层类型，倾斜煤层的应力场呈现出非对称分布特性，其力学传导机制较常规煤层更为复杂。该类型煤层底部岩层的应力响应模式与水平煤层相比，在破裂演化过程和破坏深度参数指标上均表现出明显差异性。

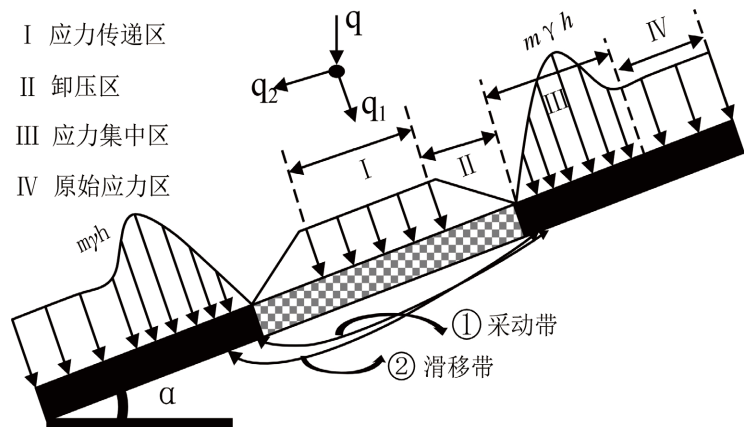


Figure 1. Schematic diagram of the supporting pressure distribution in the direction of the coal seam inclination
图 1. 煤层倾斜方向支承压力分布示意图

如图 1 所示，煤层开采扰动引发原始应力场动态再分配，采动后原始应力自工作面上方向四周围岩迁移，通过超前支承压力为主导的应力传递通道[14]，形成应力传递区域(I)；随着采空区的出现采空区上覆岩层失稳导致应力场局部消减，呈现拉 - 剪复合应力状态，形成应力传递区(II)；应力继续向工作面两

侧转移诱发上方应力梯度递增,当应力达到峰值后开始衰减,直至岩体恢复准静态平衡,这一区域为应力集中区[15];在远离工作面的区域,未受采动扰动的远场区域维持初始地应力状态,为原始应力区。上述应力分异过程在空间上呈现非对称“马鞍形”分布特征,其形态受控于煤层倾角、岩体力学属性及采动边界条件耦合作用。

岩层倾斜赋存条件下,顶底板围岩力学系统呈现多向非均衡承载特性。其力学响应主要体现在:地层产状差异导致工作面双侧垂向应力梯度差,支撑应力场极值呈现非对称迁移特征;主控应力矢量合成效应使工作面垂向荷载发生张量分解,形成法向约束应力与倾向剪切应力复合作用机制。伴随采空区卸荷效应,底板岩体经历应力重分布-损伤扩展-剪切滑移的链式响应过程,最终形成具有显著倾向优势的复合型破坏迹线。微观结构观测显示,破坏带呈现为上窄下宽的“勺型”结构,符合典型三维空间展布特征。

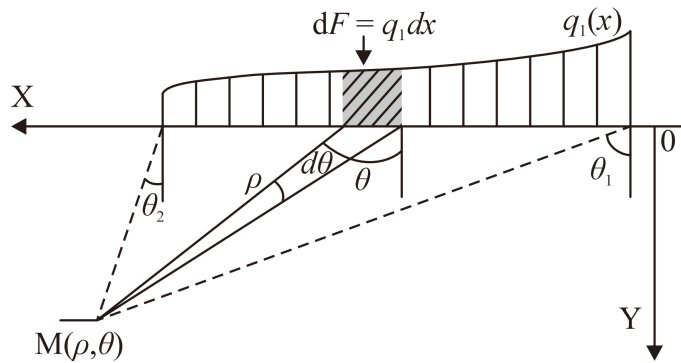


Figure 2. Calculation model for the distributed load at any point on the coal seam floor
图 2. 煤层底板任意点处分布载荷计算模型图

根据图 2 所示的煤层底板任意点载荷分布计算模型,基于空间半无限平面体理论[16],作用在底板上的应力可视为多个应力分量的叠加结果。当底板岩体空间坐标参数组 $M(\rho, \theta)$ 满足 Mohr-Coulomb 失效判据时,基于极限应力平衡条件可构建倾斜煤层底板沿倾向方向的最大破坏深度计算公式[17]:

根据图 2 可以通过力学公式计算得到倾斜煤层底板任意一点的最大主应力 σ_1 和最小主应力 σ_3 :

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= \frac{(k+1)\gamma h}{2\pi} \left[\theta(\cos \alpha + \sin \alpha) + \sin \theta \right] + \gamma \left(\frac{y}{\cos \alpha} + \frac{M}{(\lambda-1)\cos \alpha} \right) \\ \sigma_3 &= \frac{(k+1)\gamma h}{2\pi} \left[\theta(\cos \alpha - \sin \alpha) - \sin \theta \right] + \gamma \left(\frac{y}{\cos \alpha} + \frac{M}{(\lambda-1)\cos \alpha} \right) \end{aligned} \right\}$$

由岩石力学屈服判断准则可知,当岩体即将发生破坏时,其主应力会达到一种极限平衡状态,即应力满足关系为:

$$\frac{1}{2}\sigma_1 - \sigma_3 = C \cos \varphi_0 + \frac{1}{2}\sigma_1 + \sigma_3 \sin \varphi_0$$

进而可得到:

$$y = \frac{(k+1)H \cos \alpha}{2\pi} \left[\frac{\sin \theta}{\sin \varphi_0} + \theta \left(\frac{\sin \alpha}{\sin \varphi_0} - \cos \alpha \right) \right] - \frac{C \cos \alpha}{\gamma \tan \varphi_0} - \frac{M}{\lambda-1}$$

在求解过程需要把 θ 替换成关于煤层角度的关系式,即,令 $dy/d\theta = 0$ 可得

$$\theta = \arccos(\cos \alpha \sin \varphi_0 - \sin \alpha)$$

最终得到煤层倾向方向底板破坏最大深度的表达式：

$$y = \frac{(k+1)H \cos \alpha}{2\pi} \left[\frac{\sin \theta}{\sin \varphi_0} + A \left(\frac{\sin \alpha}{\sin \varphi_0} - \cos \alpha \right) \right] - \frac{C \cos \alpha}{\gamma \tan \varphi_0} - \frac{M}{\lambda - 1}$$

$A = \arccos(\cos \alpha \sin \varphi_0 - \sin \alpha)$ ； γ 代表岩层容重； θ ：极坐标下任意一点与集合单元夹角的余角； H 和 M 分别表示煤层的埋深与开采厚度，单位为米(m)； α 表示煤层倾角； φ_0 为底板内摩擦角； k 代表支承压力系数； λ 对应顶板冒落带系数； C 表征底板内聚力。

4#煤层工作面地质参数如下：埋深 700 m，采厚 1.2 m，倾角 10°；底板岩层内摩擦角 30°，平均内聚力 4.4 MPa，容重 2395 kg·m⁻³。根据工程经验，支承应力与顶板冒落带系数分别取 1.875 和 1.25。将数据代入公式，得到底板最大破坏深度为 29.2 m。

4. 数值模拟及结果分析

FLAC3D 是一种基于显式有限差分法的三维数值模拟软件，采用快速拉格朗日法进行连续介质的力学行为分析。该软件以其高效的计算能力和对大变形、非线性材料行为的适应性，被广泛应用于岩土工程、地质工程、采矿工程及地下结构稳定性分析等领域。其分析流程主要包括三个核心步骤：根据工程地质条件建立几何模型并定义材料属性；设置边界条件、初始应力场及加载条件；通过数值求解获得应力、应变及位移等关键参数的分布规律。为工程设计与风险评估提供科学依据。因此本次采用 FLAC3D 软件进行模拟。

摩尔 - 库伦(Mohr-Coulomb)弹塑性本构模型由于其以内摩擦角和粘聚力为核心的强度准则，能够有效表征煤岩体在开挖卸荷作用下以剪切破坏为主的力学响应，对于预测围岩塑性区发展与应力重分布具有重要意义。模型参数物理意义明确且易于通过常规试验获取，在工程实践层面具有良好的可操作性。然而，也必须承认该模型存在一定的局限性：其理想弹塑性假设未能考虑煤岩的应变软化行为，可能高估塑性区岩体的残余强度；各向同性的本构框架难以精确反映煤层中节理、层理等结构面导致力学各向异性。然而目前来说摩尔 - 库伦模型在捕捉煤层开挖引发的宏观力学行为主规律方面仍是一个合理且高效的选择，可以适用于本研究的工程尺度分析目的。

4.1. 建立模型

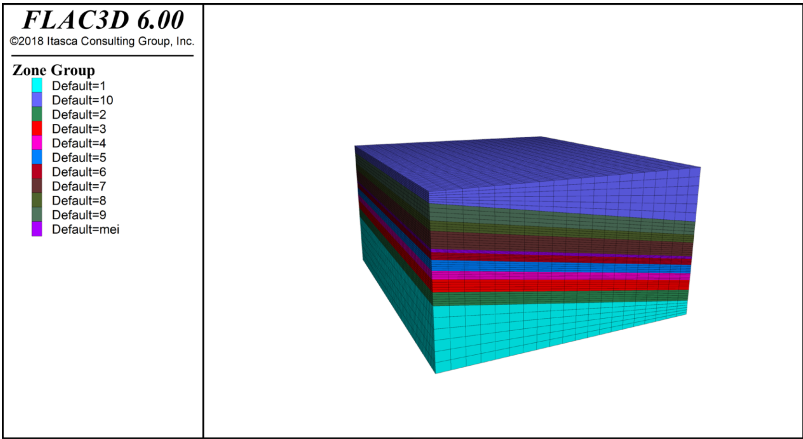


Figure 3. Stratigraphic model diagram
图 3. 地层模型图

基于羊东矿 8469 工作面实际条件，其主采深部 4#煤层，埋深 700 m，采厚 1.2 m，倾角 10°。模拟设定倾向 160 m、走向 712 m，采用摩尔 - 库伦本构模型结合塑性破坏准则，按地层新老关系自下而上，最终建立 350 m × 400 m × 220 m (倾向 × 走向 × 垂向) 的数值模型如图 3 所示，设置每 15 m 为一步距，总共分 20 次进行开挖计算，误差阈值设置为 4×10^{-4} 。同时结合工作面实际情况，建模时在其四周各预留 50 米煤柱，对模型侧向及底部边界施加法向位移约束以消除刚体位移，并在模型顶部施加 6.75 MPa 法向压应力以等效表征上覆岩层自重应力场的力学效应。模拟过程中所用的相关岩石力学参数如表 2 所示。

Table 2. Mechanical parameters required for simulating rock formations
表 2. 模拟岩层所需力学参数

岩层岩性	剪切模量 (GPa)	体积模量 (GPa)	粘聚力 (MPa)	抗拉强度 (MPa)	密度 (kg/m ³)	内摩擦角 (°)
细砂岩	2.64	5.13	3.84	2.30	2550	29
粉砂岩	2.62	4.20	3.22	2.81	2670	23
砂岩	2.55	4.87	4.45	3.56	2610	30
中砂岩	1.72	4.35	5.32	4.84	2260	28
煤层	1.51	3.52	3.34	0.90	1440	24
泥岩	1.49	3.38	2.05	0.75	2280	25
粉砂岩	2.22	4.00	1.80	1.40	2350	27
泥岩	1.72	3.40	2.20	0.85	2350	26
细砂岩	2.20	4.50	3.60	1.70	2310	32
中砂岩	2.50	4.20	5.10	5.10	2750	29
砂岩	4.30	8.70	4.60	4.20	2500	28

4.2. 结果分析

针对煤层采动效应，本次模拟采用单侧渐进开挖方式，以 15 m 为步距，累计开挖至 300 m。研究重点分析采空区围岩应力场随工作面推进的演变特征，揭示不同方位底板岩层塑性区分布规律，最终建立底板破坏深度预测模型。对初始应力进行平衡后，走向和倾向方向初始应力云图如图 4 所示。

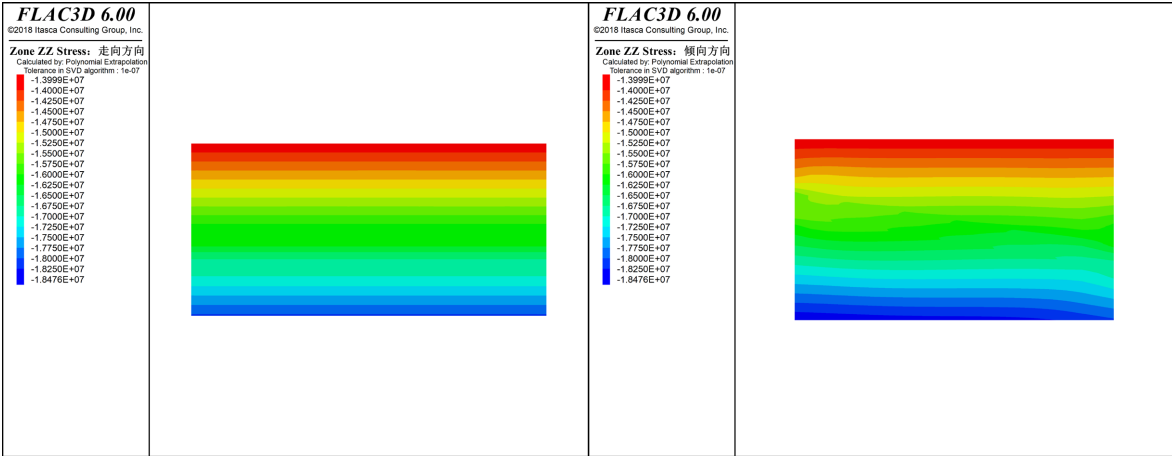


Figure 4. Initial stress contour map of direction and tendency
图 4. 走向和倾向方向初始应力云图

(1) 垂直应力结果及分析

沿工作面不同开挖长度下走向与倾向垂直应力分布特征如图 5 和图 6 所示。对比图 4 可见, 采动扰动明显改变了围岩应力场分布: 随工作面推进, 顶底板岩层出现动态扩展的长度达 75 m 时, 拱形应力等值线初步显现且梯度变化显著; 至 165 m 时顶底板应力影响域达到极值, 应力拱形态趋于稳态。采空区两侧 10~20 m 范围内形成高应力集中带, 其峰值强度随开挖进程递增, 而远场未扰动区则维持原岩应力状态且范围逐步收缩。应力场演化呈现典型“马鞍形”空间分异规律, 表现为中部卸压区与双侧高应力集中带的耦合分布模式。

(2) 塑性破坏区分布及结果分析

图 7 展示了沿煤层走向方向在不同开挖距离下工作面塑性区的分布情况; 图 8 则显示了工作面推进 180 m 时, 沿煤层倾向方向的塑性区分布。

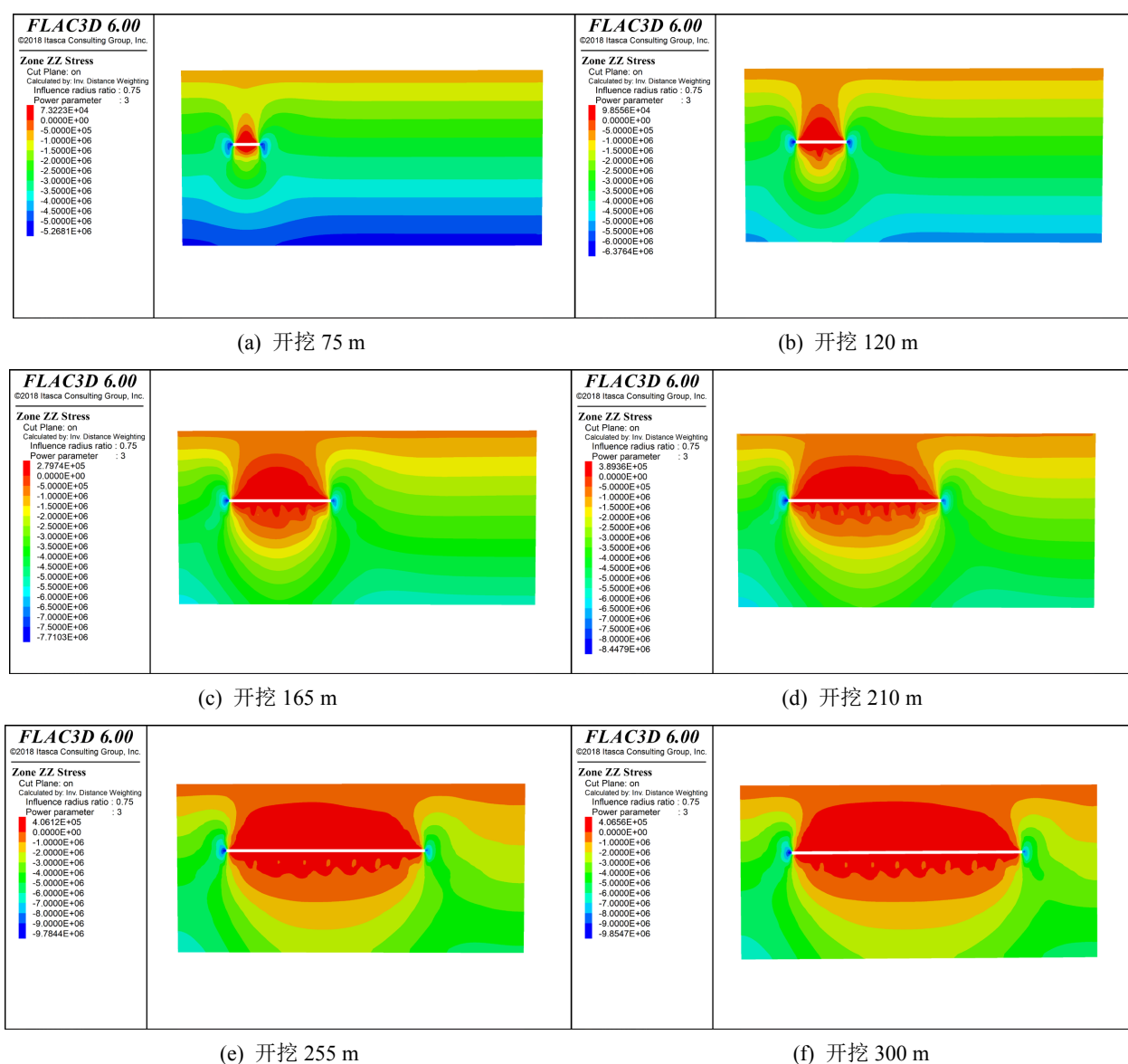


Figure 5. Contour map of vertical stress in the direction of excavation at different distances

图 5. 开挖不同距离时的走向方向垂直应力云图

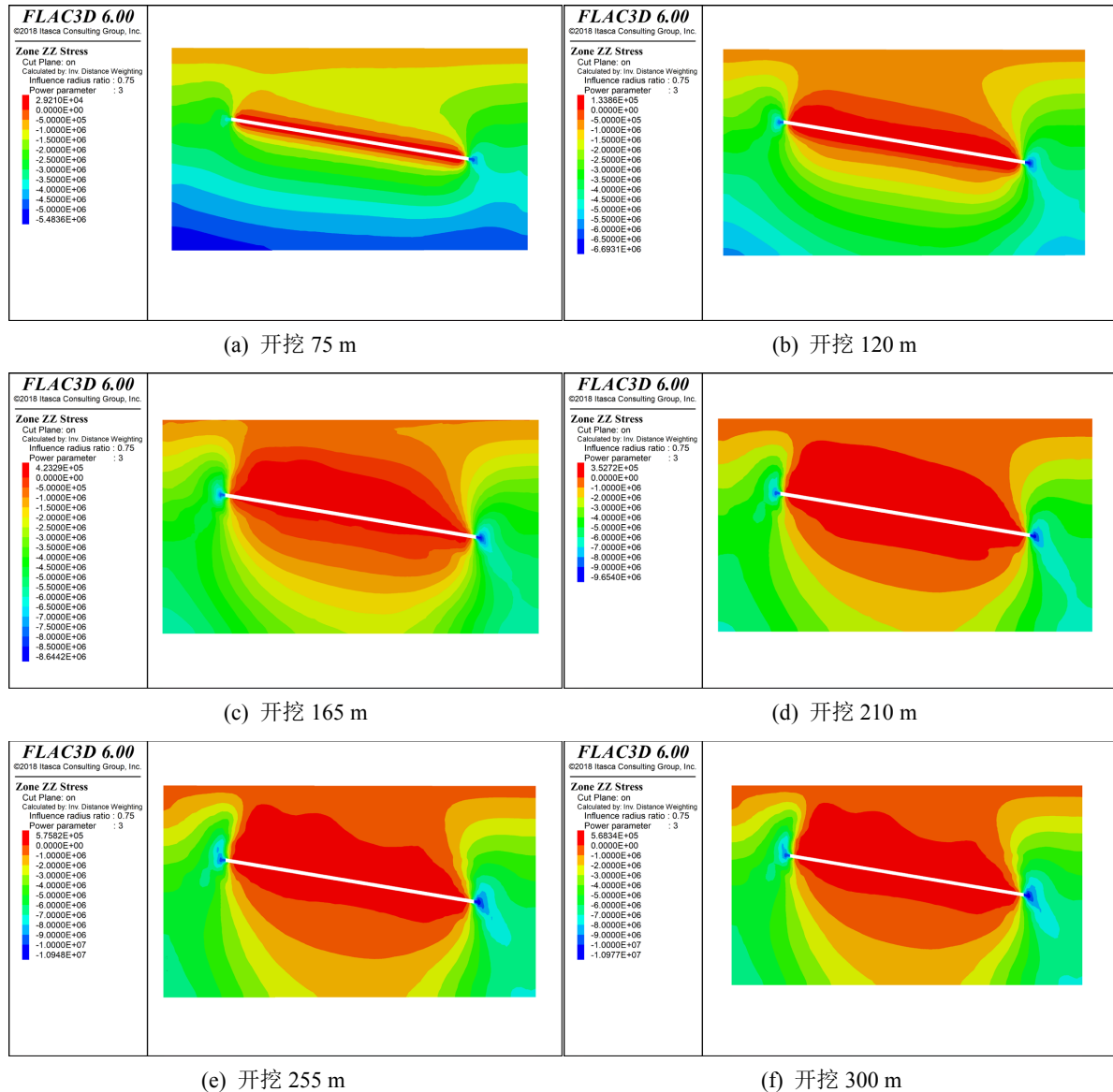


Figure 6. Cloud map of vertical stress in different inclination directions during excavation at varying distances

图 6. 开挖不同距离时的倾向方向垂直应力云图

根据图 7 的模拟结果, 采掘推进过程中, 底板破坏机制呈现阶段演化规律: 推进至 75 m 时, 以张性破坏为主, 伴随局部剪裂, 最大破坏深度达 14.55 m。岩体处于相对稳定状态。推进至 120 m 时, 塑性区横向扩展, 底板最大破坏深度增至 15.61 m, 仍以拉张破坏为主, 次生裂隙网络局部聚集但未形成贯通面。开挖至 165 m 时, 破坏范围在横向和纵向上扩展, 裂隙贯通, 底板最大破坏深度达 19.7 m, 工作面两端因应力集中发生剪切破坏。推进至 210 m 时, 破坏范围和深度继续增大, 最大深度为 23.02 m, 破坏形态以拉张破坏为主。当开挖距离达到 255~300 m 时, 塑性区横向扩展, 垂向破坏深度稳定在 28.75 m, 底板形成稳定破坏带, 出现大面积剪切破坏, 岩体裂隙被压实, 应力趋于稳定, 工作面两端仍以剪切破坏为主。

通过图 8 可知, 煤层倾向方向上岩层的塑性破坏特征与走向方向表现出较高的相似性。具体而言, 在走向方向上, 塑性破坏区域呈现对称分布特征; 而在倾向方向上, 破坏形态表现为典型的非对称结构, 其几何特征可描述为下部扩展、上部收敛的“勺型”。

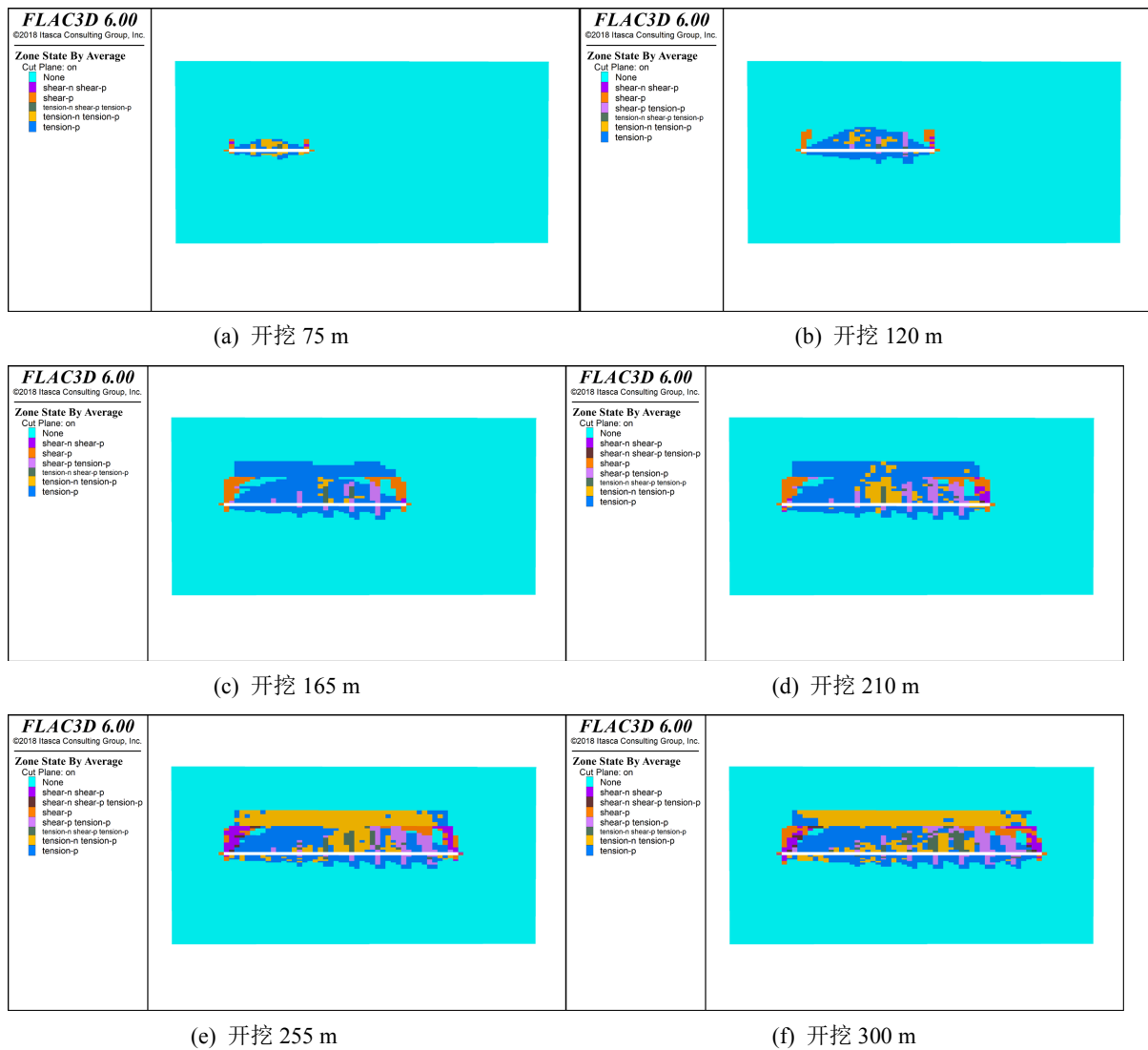


Figure 7. Excavation at different distances in the direction of the direction of plastic failure diagram
图 7. 走向方向上开挖不同距离塑性破坏图

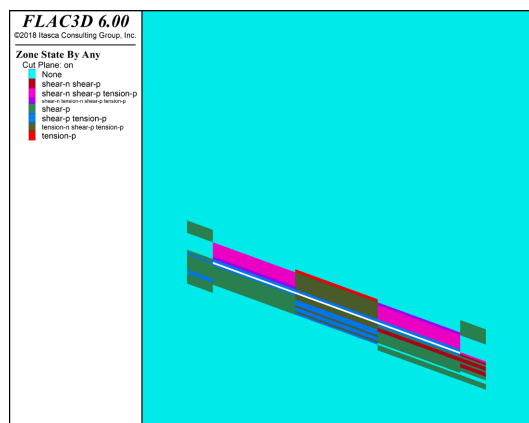


Figure 8. Profile diagram of the plastic zone in the direction of inclination at 180 m
图 8. 推进 180 m 时倾向方向塑性区剖面图

通过对最大地板破坏深度进行理论计算和数值模拟可以发现两种方法所得到的结果比较接近, 综合分析认为工作面最大破坏深度为 29.2 m。

5. 讨论

本研究通过理论分析与数值模拟, 系统揭示了倾斜煤层开采过程中底板破坏深度的动态演化规律, 得出最大破坏深度理论值与模拟值, 对比发现, 二者吻合较好。与既有研究对比发现, 本文结果处于缓倾斜煤层底板破坏深度经验范围的上限, 这与煤层埋深较大、岩体强度较高密切相关; 同时, 底板破坏呈现的“勺型”非对称形态与同类倾斜煤层研究结论一致, 进一步验证了倾角对破坏结构的控制作用。理论值与模拟值之间的差异, 可能源于理论模型对岩体均质连续介质的理想化假设, 以及数值模拟中未能完全体现深部岩体的结构面效应。

本研究仍存在一定局限性, 如采用的摩尔-库伦模型未考虑岩体各向异性与流变行为, 未引入渗流-应力耦合机制以分析水文地质影响, 且缺乏现场实测数据的直接验证。后续研究可引入更复杂的本构关系、开展流固耦合模拟, 并结合现场实测数据, 以进一步提升深部倾斜煤层底板破坏预测的精确性与工程适用性。

6. 结论

- (1) 倾斜煤层开采后支承压力呈“马鞍状”多区分布, 底板受倾斜应力分解形成“勺型”滑动破坏带, 最大破坏深度通过对比理论计算与数值模拟结果, 综合确定为 29.2 m。
- (2) 工作面开挖引发岩层应力重分布: 上下部一定范围形成应力降低区, 垂直应力随开挖推进逐渐递减; 两侧 10~20 m 范围形成应力集中区, 集中峰值与开挖距离呈正相关。
- (3) 底板塑性破坏范围随开挖推进逐步扩展, 开挖至 255 m 时破坏深度达最大值 28.75 m (横向持续延展、垂直方向停止加深); 破坏形式以拉张破坏为主, 破坏区域呈“下部宽大、上部窄小”的“勺型”特征。

参考文献

- [1] 胡健. 全球煤炭资源利用现状、供需格局及发展趋势[J]. 中国煤炭, 2024, 50(11): 153-162.
- [2] 程坤. 我国煤炭资源勘查开发主要问题及对策措施[J]. 中国煤炭, 2024, 50(7): 1-7.
- [3] Zhang, B., Luo, H., Lv, L., et al. (2018) Analysis of Ecological Environment Impact of Coal Exploitation and Utilization. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **121**, Article 032002. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/121/3/032002>
- [4] 田凡凡, 薛喜成. 煤层底板开采破坏深度研究综述[J]. 能源与环保, 2022, 44(1): 289-298.
- [5] 李文平, 乔伟, 李小琴, 等. 深部矿井水害特征、评价方法与治水勘探方向[J]. 煤炭学报, 2019, 44(8): 2437-2448.
- [6] 吴培益, 易四海, 才向军, 等. 深部开采底板采动破坏深度演化规律研究[J]. 煤炭工程, 2023, 55(3): 107-112.
- [7] Liu, S., Liu, W., Huo, Z., et al. (2019) Early Warning Information Evolution Characteristics of Water Inrush from Floor in Underground Coal Mining. *Arabian Journal of Geosciences*, **12**, Article No. 30. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-4181-3>
- [8] 谢和平. 深部岩体力学与开采理论研究进展[J]. 煤炭学报, 2019, 44(5): 1283-1305.
- [9] 查春雷, 袁二军, 史立群, 等. 缓倾斜煤层开采底板破坏深度数值分析研究[J]. 中国矿业, 2024, 33(8): 169-175.
- [10] 李彦恒, 许劲峰, 满剑奇, 等. 深部倾斜煤层采动底板破坏演化特征分析[J]. 中国矿业, 2021, 30(6): 140-145.
- [11] 黄辉, 宋喜东, 虎晓龙, 等. 缓倾斜煤层采动底板破坏空间特征研究及应用[J]. 矿业安全与环保, 2024, 51(5): 1-8.
- [12] 孟亚周, 张钦, 闫扬帆. 倾斜不稳定煤层采动工作面底板破坏深度研究[J]. 煤炭技术, 2023, 42(3): 85-90.
- [13] 晁腾跃, 华心祝, 朱晔. 中组煤上覆煤层开采冲击荷载扰动下底板破坏深度研究[J]. 中国矿业, 2024, 33(1): 138-146.

- [14] 钱鸣高, 缪协兴, 何富连. 采场“砌体梁”结构的关键块分析[J]. 煤炭学报, 1994(6): 557-563.
- [15] Zhang, F., Shen, B. and Guo, W. (2020) Stress Distribution and Failure Characteristics of Deep Inclined Seam and Overhead Mining along Strike Longwall Floor. *International Journal of Mining and Mineral Engineering*, **11**, 306-322. <https://doi.org/10.1504/IJMME.2020.111933>
- [16] 李忠华, 官福海. 弹塑性煤柱的应力场计算[J]. 采矿与安全工程学报, 2006(1): 79-82.
- [17] 孙建. 倾斜煤层底板破坏特征及突水机理研究[D]: [博士学位论文]. 徐州: 中国矿业大学, 2011.