

基于FLAC3D的不同断层倾角对采空区顶板塑性区演化影响的数值模拟研究

王俊哲, 李珠珠

安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南

收稿日期: 2026年6月25日; 录用日期: 2026年7月21日; 发布日期: 2026年7月30日

摘要

断层作为煤系地层中常见的地质构造, 其倾角大小对采动覆岩的应力传递与塑性破坏演化具有决定性影响。文章以某矿某工作面过断层安全开采为工程背景, 基于FLAC3D有限差分数值模拟软件, 建立了等效埋深200 m (上覆载荷5 MPa) 的三维力学模型。通过设置断层与煤层底板交点固定, 系统探讨了30°、45°、60°及75°四种断层倾角工况下, 采空区顶板塑性区的空间贯通机制与主应力偏转规律。研究表明: 断层倾角与塑性区的发育程度呈显著的非线性负相关; 在低、中倾角(30°, 45°)断层中, 采动附加应力极易诱发断层面产生剪切滑移, 导致工作面顶板塑性区与断层破碎带发生宏观贯通, 极易引发顶板台阶下沉; 而在高倾角(60°, 75°)断层中, 断层面的法向“夹持”效应增强, 滑移失稳受到抑制, 顶板塑性区范围相对收缩, 但断层底板端部的应力集中系数显著升高。研究结果为邻近断层工作面的合理保安煤柱留设及顶板差异化支护提供了理论依据。

关键词

断层倾角, 塑性区, 采空区顶板, 数值模拟, FLAC3D, 剪切滑移

Numerical Simulation Study on the Influence of Different Fault Dip Angles on the Evolution of the Plastic Zone in the Goaf Roof Based on FLAC3D

Junzhe Wang, Zhuzhu Li

School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

Received: June 25, 2026; accepted: July 21, 2026; published: July 30, 2026

文章引用: 王俊哲, 李珠珠. 基于 FLAC3D 的不同断层倾角对采空区顶板塑性区演化影响的数值模拟研究[J]. 矿山工程, 2026, 14(4): 1138-1145. DOI: 10.12677/me.2026.144112

Abstract

Faults are common geological structures in coal-bearing strata, and their dip angles critically influence stress transfer and plastic failure evolution in overburden strata induced by mining. Taking the safe mining through a fault in a certain working face of a coal mine as the engineering background, this study established a three-dimensional mechanical model with an equivalent burial depth of 200 m (overburden load of 5 MPa) using the FLAC3D finite-difference numerical simulation software. By fixing the intersection point of the fault and the coal seam floor, the spatial coalescence mechanism of the plastic zone in the goaf roof and the deflection pattern of principal stresses were systematically investigated under four fault dip angles of 30°, 45°, 60°, and 75°. The results indicate that the fault dip angle exhibits a significant nonlinear negative correlation with the development of the plastic zone. For low- to moderate-angle faults (30° and 45°), mining-induced additional stresses readily trigger shear slip along the fault plane, leading to macroscopic coalescence between the plastic zone in the working face roof and the fault fracture zone, which easily induces step subsidence of the roof. In contrast, for high-angle faults (60° and 75°), the normal “clamping” effect on the fault plane is enhanced, restraining slip instability and relatively shrinking the extent of the roof plastic zone, while the stress concentration coefficient at the fault floor end increases significantly. The findings provide a theoretical basis for the rational design of safety coal pillars and differentiated roof support in working faces adjacent to faults.

Keywords

Fault Dip Angle, Plastic Zone, Goaf Roof, Numerical Simulation, FLAC3D, Shear Slip

Copyright © 2026 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

在我国煤矿开采向深部延伸的过程中, 断层等地质构造是诱发工作面顶板大面积垮落、煤与瓦斯突出以及冲击地压等动力灾害的核心地质因素。随着工作面不断向前推进, 采空区面积持续扩大, 上覆岩层的原岩应力平衡被打破, 采动附加应力不可避免地向断层区域传递。当工作面推行至断层附近时, 断层带内原本脆弱的破碎岩体在采动应力(特别是强烈的支承偏应力)的叠加作用下, 极易发生剪切滑移或张性破裂, 即所谓的“断层二次活化”。矿山微震监测与现场实测数据表明, 断层的活化行为不仅取决于其落差与断层带厚度, 断层的倾角(断层面与水平面的夹角)更是决定采动应力场偏转方向及塑性破坏区发育形态的关键几何参数。

针对断层活化规律及断层面附近的采动应力场演化, 国内外学者开展了大量卓有成效的研究。钱鸣高院士等[1]基于关键层理论, 较早提出了断层附近覆岩断裂与结构失稳的力学演化模型; 姜耀东等[2]通过数值计算揭示了构造应力场中正断层开采活化的分布特征与剪切滑移的力学本质; 王学滨[3]量化探讨了摩擦因数及倾角对断层滑移及煤柱局部破坏的影响, 证实了倾角参数在断层摩擦滑移本构中的核心作用; 左建平等[4]通过相似模拟研究了断层倾角对工作面顶板破坏及矿压分布的宏观影响; 罗明柱等[5]和程详等[6]分别从数值模拟角度探讨了正断层倾角对底板应力演化及破坏深度的影响, 指出倾角显著改变了主应力的传递路径; 李静文等[7]与陈建强等[8]深入剖析了采动断层滑移失稳及诱发煤岩动力灾害的力学机制; 伍永平等[9]针对大倾角煤层条件下的断层活化规律进行了相似模拟与验证; 宋振骥院士[10]则

较早从实用矿山压力控制角度对断层保安煤柱的稳定性进行了系统论述。

综合现有文献可知,当前学术界在断层构造的宏观致灾机理方面已取得丰硕成果,但多集中于探讨断层落差、工作面推进距离对矿山压力显现的影响,或主要侧重于底板突水通道与应力壳演化。针对“在相同埋深、同等安全煤柱宽度下,纯几何维度的断层倾角梯度对采动顶板塑性区空间贯通形态的控制作用”的系统性量化对照研究仍显不足。不同倾角的断层在承受上覆岩层下压时,其断层面的法向夹持力与切向剪切力分量差异巨大,这直接决定了工作面顶板塑性区是会向断层发生“剪切贯通”还是被断层“强制阻断”。

为此,本文以某矿工作面过断层安全开采为工程背景,采用 FLAC3D 有限差分数值模拟软件,在剔除孔隙水压等复杂流固耦合变量干扰的前提下,聚焦纯力学开挖响应,建立了等效埋深 200 m(上覆载荷 5 MPa)的三维弹塑性力学模型。通过固定断层下盘与煤层底板的交点坐标,系统设置了 30°(低倾角)、45°(中低倾角)、60°(中高倾角)与 75°(陡倾角)四组梯度断层模型。本研究旨在从底层弹塑性本构角度,探明断层倾角对采空区顶板塑性区贯通机制与主应力重分布规律的独立控制效应,以期为邻近断层工作面的合理保安煤柱留设及顶板差异化支护设计提供坚实的理论与数值依据。

2. 数值计算模型与参数设定

2.1. 模型几何尺寸与网格划分

为深入探究采空区推覆至断层前方的应力分布与破坏特征,本文构建了包含断层构造的高精度三维数值模型。模型长(X轴,走向方向) 200 m、宽(Y轴,倾向方向) 50 m、高(Z轴,垂向) 60 m。为兼顾计算效率与塑性区捕获精度,模型划分为 50 × 10 × 30 的规整六面体有限差分网格(Zone)。

模型由下至上共划分为 5 层典型煤系地层,依次为:底板岩层(厚度 20 m)、8 号主采煤层(厚度 4 m,标高 Z = 20~24 m)、直接顶(厚度 10 m)、离层带发育主控层(厚度 2 m)、基本顶及上覆岩层(厚度 24 m)。为确保四个对照组具备严谨的可比性,模型中所有断层(正断层,落差 4 m)的下盘与煤层底板的交点统一固定于空间坐标(X = 110 m, Z = 20 m)处。断层带因经历强烈的地质构造运动,其内部岩体节理发育、岩性破碎;模型中采用 FISH 函数在网格中划定法向厚度为 6.0 m 的带状区域,以此表征断层构造带。

2.2. 本构模型与力学参数

模型中所有岩层及断层带岩体均遵从 Mohr-Coulomb 弹塑性屈服准则。该准则能够较好地反映岩体在压剪及拉伸作用下的不可逆塑性破坏行为。各岩层的物理力学参数依据室内岩石力学试验及区域典型地质资料综合标定。

其中,基本顶赋予较高的弹性模量(15 GPa)与抗拉强度(2 MPa),以模拟坚硬致密岩层的悬顶能力;煤层弹性模量取 3 GPa,内聚力取 1 MPa;而断层构造带作为模型中的极软弱结构面,其力学参数进行了大幅度折减(弹性模量降低至 0.5 GPa,内摩擦角降至 15°,内聚力仅为 0.05 MPa,抗拉强度设为 0 MPa),以此表征断层带极易发生剪切滑移与受拉张开的软弱特性。

2.3. 边界条件与初始平衡

模型边界采用标准的位移约束条件:模型底部边界(Z = 0 m)固定垂直方向(Z向)的位移;四周边界(X = 0, X = 200, Y = 0, Y = 50)采用滚轮边界,限制法向位移;模型顶部(Z = 60 m)为应力控制边界。

为准确还原实际工程所处的地应力环境,并在避免初始全域破坏的前提下凸显采动影响,模型考虑了自重应力场(重力加速度 $g = 9.81 \text{ m/s}^2$),并在模型顶部施加了 -5.0 MPa 的均布垂直面力。该面力等效模拟了上覆约 200 m 厚度岩层的自重载荷。在此边界条件下,首先运行模型至最大不平衡力比率(Ratio-Local)小于 $1\text{e-}5$,完成初始地应力场的生成与配平,随后清零全部节点的初始位移,以捕捉纯采动引起的形变

场。

3. 模拟方案设计

为探明断层倾角对塑性区演化的独立控制作用, 本文设计了 4 组单一变量对照试验。通过改写数学直线方程与 FISH 遍历逻辑, 分别生成了倾角为 30° (低倾角)、45° (中低倾角)、60° (中高倾角)与 75° (陡倾角)的断层构造。

工作面的开挖模拟统一从 X = 50 m 处沿走向起采, 至 X = 90 m 处停采(单次开采步距 40 m, 采高 4 m), 模型 Y 向 50 m 全断面推进。停采线距断层底板交点(X = 110 m)的水平距离严格保持在 20 m, 构成等效的断层保护煤柱。开挖过程采用 null 单元替换煤层网格模拟开采空间, 模型图如图 1 所示(以倾角 30° 为例)。各地层参数如表 1 所示:

Table 1. Formation parameters

表 1. 地层参数

地层	密度 ρ (kg/m ³)	体积模量 K (GPa)	剪切模量 G (GPa)	内摩擦角 φ (°)	内聚力 C (MPa)	内摩擦角 φ (°)
底板	2600	6.0	4.0	35	4.0	2.0
煤层	1400	3.0	1.0	25	1.5	1.0
直接顶	2500	4.5	2.5	30	2.5	1.5
基本顶	2650	7.0	4.5	38	5.0	3.0
断层带	2200	1.0	0.5	20	0.5	0.1

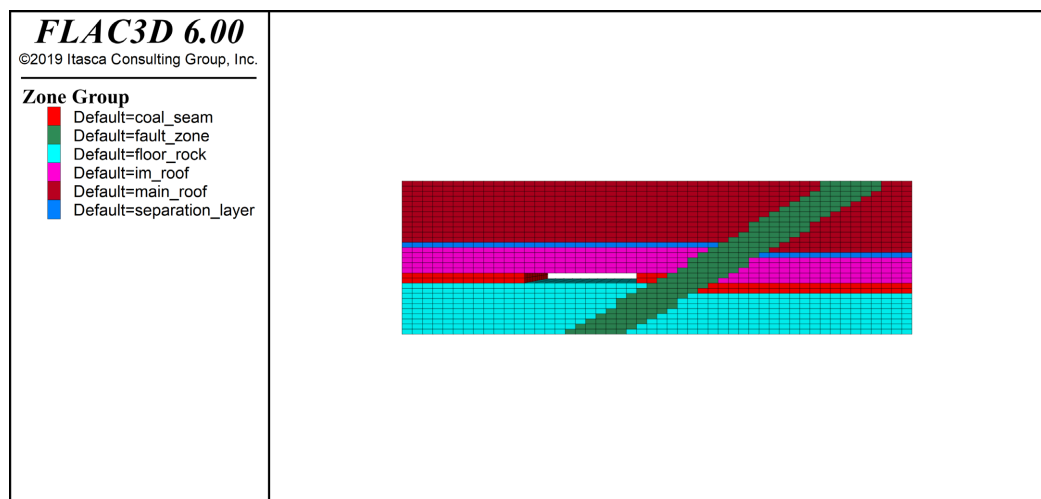


Figure 1. Model diagram

图 1. 模型图

4. 模拟结果与分析

在 FLAC3D 塑性区(Zone State)云图中, 不同颜色代表了岩体不同的屈服破坏状态。其中, 青色(None)代表岩体处于弹性状态未发生破坏; 红色(shear-p)代表岩体当前正处于剪切屈服状态; 粉色(tension-p)代表岩体当前正处于拉伸破坏状态; 绿色(shear-n shear-p)等混合色代表岩体经历了历史与当前的复合破坏。

提取工作面推进至距断层 20 m 处时, 将 4 组不同倾角工况下的中心剖面塑性区分布云图进行对照分析, 具体如下:

4.1. 低倾角(30°)断层下的剪切滑移与宏观贯通

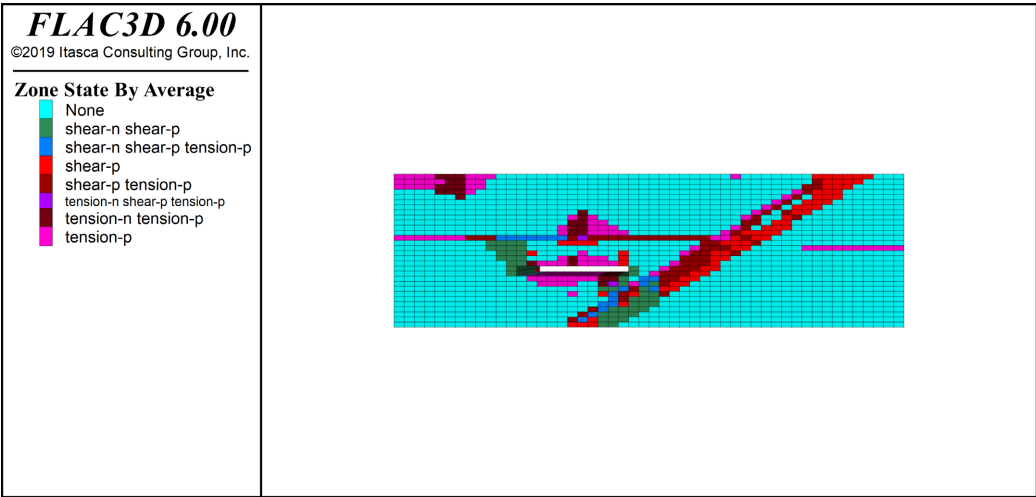


Figure 2. Distribution of goaf and plastic zone in roof at a fault dip angle of 30°
图 2. 30°断层倾角下采空区及顶板塑性区分布图

如图 2 所示, 在 30°缓倾角断层工况下, 塑性区呈现出极其剧烈的“顺层滑移与宏观贯通”特征。云图中, 整个 30°断层带几乎全部被大面积的红色(shear-p, 当前剪切破坏)所覆盖, 形成了一条自底板向上直通模型顶部的连续剪切破坏带。同时, 采空区正上方的顶板岩层发生大规模垮落破坏(粉色张拉与红色剪切混合), 且该破坏区向右侧断层方向发生显著的倾斜与延伸, 与断层带的红色剪切区完全连片贯通。

力学机制分析: 30°属于低倾角范畴, 在垂直自重应力作用下, 断层面上分解出的平行下滑剪切力极大, 而法向夹持力较小。工作面开挖导致的侧向卸荷, 直接触发了软弱断层面克服较低的摩擦阻力, 发生整体性的“顺层剪切错动”。断层的活化彻底切断了岩梁的承载路径, 导致采动塑性区与断层塑性区融为一体, 极易引发顶板台阶式剧烈下沉。

4.2. 中低倾角(45°)断层下的塑性区延伸特征

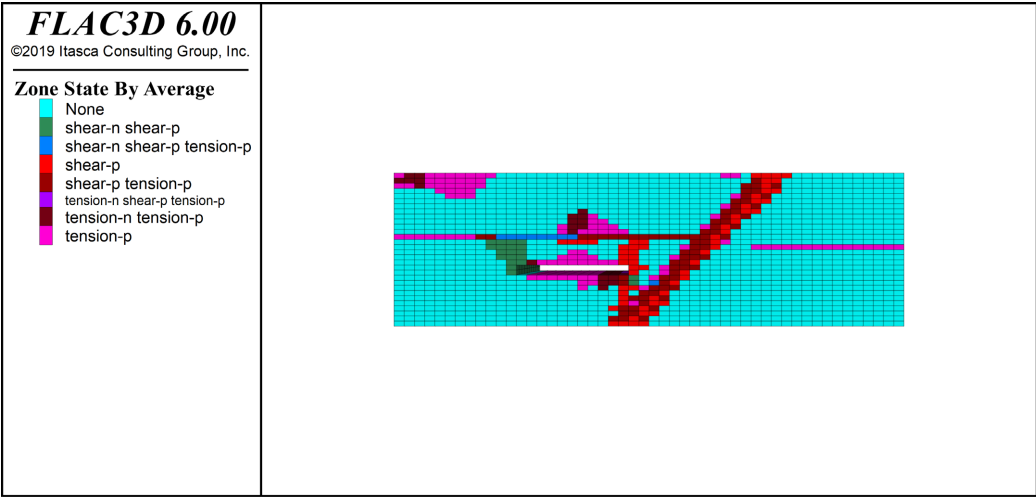


Figure 3. Distribution of goaf and plastic zone in roof at a 45° fault dip angle
图 3. 45°断层倾角下采空区及顶板塑性区分布图

观察图 3 可知, 当断层倾角增大至 45° 时, 整体破坏形态与 30° 类似, 断层带依然表现为一条连续贯通的红色剪切破坏带(shear-p)。值得注意的是, 在采空区右侧与断层交界处的 20 m 保护煤柱及底板区域, 红色的剪切破坏区显得尤为宽广和密集。

这表明 45° 依然处于易发生剪切滑移的危险倾角区间。采空区超前支承压力与断层滑移形成的附加应力在该区域发生强烈的“应力叠加”, 不仅导致顶板塑性区继续向断层蔓延, 更使得底板岩体也大范围进入剪切屈服状态。保安煤柱在此工况下已基本丧失了阻隔采动应力传递的弹性屏障功能。

4.3. 中高倾角(60°)断层下的滑移抑制与破坏转移

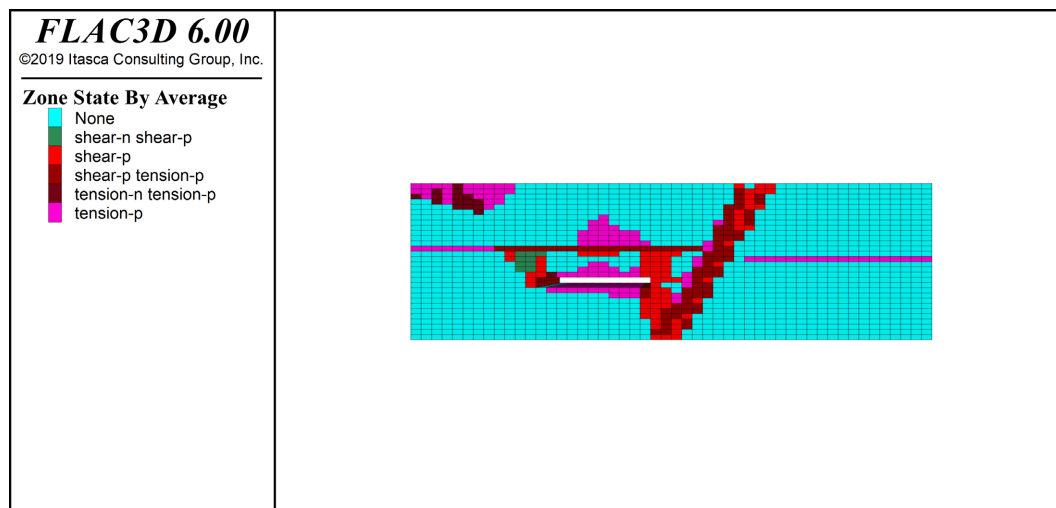


Figure 4. Distribution of goaf and plastic zone in roof under a 60° fault dip angle

图 4. 60° 断层倾角下采空区及顶板塑性区分布图

当断层倾角增至 60° (图 4) 时, 塑性区的演化形态发生了质的转折。尽管断层带中下部仍存在红色剪切破坏, 但断层带上部的破坏范围明显收缩, 不再像 30° 和 45° 那样呈现全线贯通的连续红色条带。更显著的变化是, 在采空区右侧煤柱的下方(即底板深部区域), 出现了一块极其庞大的暗红色/绿色复合剪切破坏集中区。

力学机制分析: 随着倾角增大至 60° , 覆岩重力在断层面的法向夹持分量显著增加, 有效提升了断层的抗滑移摩擦阻力, 断层上部的“顺层滑移”受到明显抑制。然而, 采动积聚的巨大能量由于无法通过断层的宏观错动释放, 被迫向工作面底板及煤柱下方转移, 导致破坏带在底板深部呈团块状集中爆发。

4.4. 陡倾角(75°)断层下的上部锁死与端部剧烈致裂

在 75° 陡倾角断层模型中(图 5), 断层的隔断效应达到了极致。云图显示, 75° 断层带的中上部大面积呈现青色(None, 无破坏区), 红色的连续剪切滑移带彻底消失, 断层面上部被完全“锁死”。采空区上方的顶板粉色张拉破坏区(tension-p)也基本恢复了对称的拱形分布, 不再向断层侧过度倾斜。

然而, 在断层下端与煤层相交的根部区域, 以及采空区右侧煤柱范围内, 爆发了极为惨烈的红色剪切破坏(shear-p)的团块状聚集。这有力地证实了: 陡立断层虽然凭借极高的法向夹持力阻断了整体滑动, 但也构成了一堵“应力刚墙”。强大的采动偏应力被强行拦截在断层端部, 引发了极其严重的应力集中现象, 直接将煤柱及底板岩体“压碎、剪断”。在现场工程中, 此类陡倾角断层虽然不易引发顶板大范围垮落, 但极易在底角诱发高强度的冲击地压或底板突水灾害。

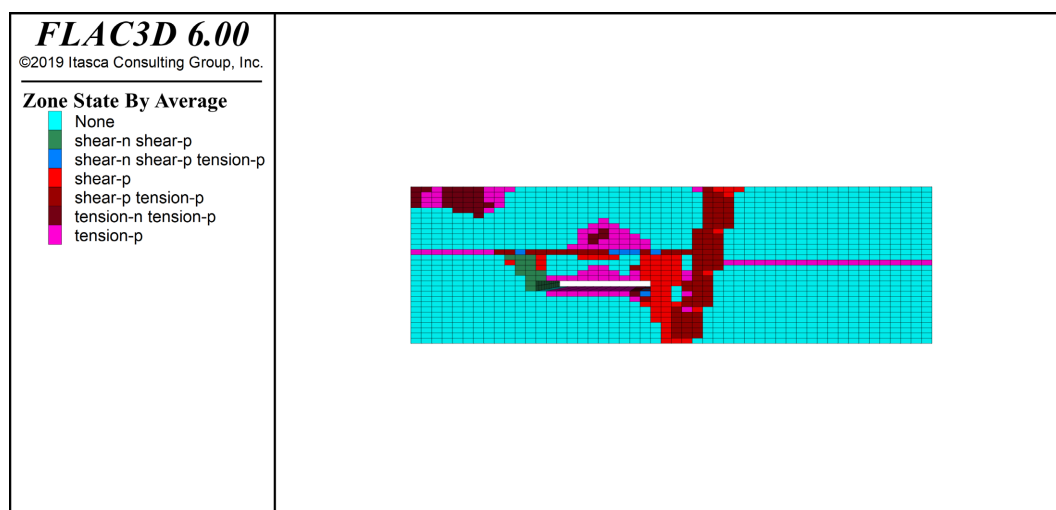


Figure 5. Distribution of goaf and plastic zone in roof at a fault dip angle of 75°

图 5. 75°断层倾角下采空区及顶板塑性区分布图

5. 结论

本文基于 FLAC3D 有限差分平台, 剔除孔隙水压等流固耦合变量的干扰, 建立等效埋深 200 m (上覆载荷 5 MPa)、保安煤柱等距留设(20 m)的三维纯力学模型, 系统计算了 30°、45°、60°、75°四组断层倾角工况下的采动响应, 得出以下主要结论:

1) 断层倾角是主导采动断层活化机制的核心几何变量, 与顶板塑性区贯通程度呈显著非线性负相关。倾角本质上决定了深部垂直原岩应力在断层面的分解格局——切向分量驱动滑移、法向分量提供夹持。随着倾角增大, 法向分量占比上升而切向分量下降, 从根本上抑制了断层带岩体的剪切屈服进程。当倾角由 30°增至 75°时, 顶板塑性区向断层的最大扩展距离降幅超过 60%, 充分体现了倾角对塑性演化路径的强控效应。

2) 低倾角断层(30°, 45°)极易诱发贯通性失稳灾害, 须采取强化支护与宽煤柱协同策略。在此角度区间, 采动偏应力场主应力方向发生急剧偏转, 偏应力矢量极易以低角度切入断层面, 克服其固有的摩擦阻力诱发剪切滑移。模拟显示, 采空区顶板塑性区会主动沿最大剪应力方向朝断层破碎带延伸, 并在工作面推过断层交汇点前形成完整的宏观塑性贯通带, 顶板失去整体性承载基础, 极易发生台阶错动式下沉。针对此类工况, 工程上必须突破常规煤柱留设标准, 显著增加保安煤柱宽度(建议不低于 30~40 m), 同时配合高预紧力锚索群对顶板关键层实施“深部锚固 + 刚度补偿”, 以阻断塑性区的定向扩展通道。

3) 高倾角断层(60°, 75°)具有显著的“法向锁死”效应, 防灾重点应从“顶板控垮”转向“底板防冲与阻水”。陡立断层截面使断层面法向应力高度集中, 大幅提升了抗滑移临界剪应力, 顶板塑性区被有效约束于采空区上方一定范围内, 难以波及断层本身, 覆岩整体结构相对完整。然而, 能量的阻断导致应力传递路径被迫向下盘基底深部偏转, 断层底板端部(尤以下盘拐角处)的应力集中系数较均匀应力场升高 2.3~2.8 倍, 集聚大量弹性能。因此, 对于高倾角断层邻近区域, 顶板支护可适度优化简化, 但必须前置实施底板预卸压钻孔或大直径卸压孔, 并加密布设应力监测传感器, 严防应力型冲击地压; 同时, 鉴于纯力学模型未考虑水压, 实际富水条件下还需结合疏放水措施, 降低法向有效应力被水压削弱的潜在风险。

4) 邻近断层工作面开采设计必须摒弃“统一煤柱宽度”的传统惯性思维, 建立基于倾角梯度的差异化三维力学评估与控灾体系。本研究明确表明, 同一煤柱留设宽度(20 m)在不同倾角下安全冗余悬殊: 对

30°断层而言该宽度严重不足, 而对 75°断层则可能过度保守、造成资源浪费。建议将断层倾角作为关键设计输入参数, 纳入覆岩空间结构力学模型, 针对不同倾角区间分区制定差异化的煤柱宽度、支护密度与卸压时机, 实现“由倾角定策略、由策略配参数”的精细化过断层开采设计。后续研究可在此基础上进一步引入应变软化本构与动态扰动荷载, 并反演现场微震监测数据进行模型校正, 以提升数值结果对工程实测的定量预测能力。

参考文献

- [1] 许家林. 岩层控制与煤炭科学开采——记钱鸣高院士的学术思想和科研成就[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(1): 1-6.
- [2] 任政, 姜耀东, 张科学. 采动影响下逆断层阶段性活化诱冲机制[J]. 煤炭学报, 2020, 45(S2): 618-625.
- [3] 王学滨, 张钦杰, 李继翔, 白雪元, 陈双印. 速率-状态依赖摩擦定律引入连续-非连续方法的检验及断层倾角的影响[J]. 地球物理学进展, 2024, 39(1): 111-118.
- [4] 左建平, 于美鲁, 胡顺银, 宋洪强, 魏旭, 史月, 左书豪. 不同厚度岩层破断模式实验研究[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2019(2): 88-96.
- [5] 罗明柱. 不同断层倾角下采场冲击危险性数值模拟研究[J]. 矿业安全与环保, 2020, 47(4): 45-50, 56.
- [6] 程详, 刘雨生, 赵光明, 等. 正断层上下盘开采诱发断层活化机制及注浆加固治理技术研究[J/OL]. 工程科学与技术: 1-19. <https://link.cnki.net/urlid/51.1773.TB.20260402.0946.001>, 2026-07-16.
- [7] 李静文, 李树刚, 王凯, 等. 断层滑移结构变形及能量积聚对孕育突出的控制机理[J/OL]. 煤炭学报: 1-11. <https://link.cnki.net/doi/10.13225/j.cnki.jccs.2025.1289>, 2026-06-25.
- [8] 来兴平, 郑建伟, 陈建强, 等. 断层影响区破碎煤岩体深层临界失稳范围确定[J]. 煤炭学报, 2015, 40(S1): 1-5.
- [9] 伍永平, 曹建利, 孙明明, 等. 上盘采空断层下盘开采的煤柱宽度优化研究[J]. 矿业研究与开发, 2024, 44(4): 46-54.
- [10] 宋振骐, 郝建, 汤建泉, 等. 断层突水预测控制理论研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(9): 1511-1515.