

断层邻近倾斜煤层开挖回填与不回填围岩响应对比研究

梁翔翔

安徽理工大学地球与环境学院, 安徽 淮南

收稿日期: 2026年7月1日; 录用日期: 2026年7月31日; 发布日期: 2026年8月7日

摘要

为比较断层邻近倾斜煤层开采中采空区回填对围岩响应的影响, 建立含上盘、断层弱化带和下盘的三维数值模型, 设置仅开挖不回填和边开挖边回填两种工况, 模拟工作面沿x方向分步推进过程中垂向应力、垂向位移和塑性区的演化。工作面布置于上盘煤层内, 由 $x = 190\text{ m}$ 推进至 $x = 310\text{ m}$, 步距 10 m , 共推进12步; 在第12步回填工况基础上, 对围岩弹性模量、围岩黏聚力及抗拉强度、断层带强度参数和等效上覆荷载进行 $\pm 20\%$ 单因素扰动。计算结果显示, 在既定参数和及时回填假定下, 回填体承担部分上覆荷载, 采空区支承状态得到改善。第12步时, 仅开挖工况最大下沉量为 2936.85 mm , 回填工况为 64.16 mm , 降低 97.82% ; 塑性单元数由870个降至95个, 降低 89.08% ; 峰值垂向压应力由 19.03 MPa 增至 25.65 MPa , 反映回填体参与了荷载传递。三项响应指标对等效上覆荷载的敏感性均最高。模型参数取自现有FLAC3D建模文件, 尚未通过现场岩样试验、RMR/Q分级和地应力实测进行独立反演; 断层按弱化带处理, 且未考虑断层面滑移、回填滞后、压实及渗流耦合作用。所得结果主要用于比较两种工况的相对差异和参数变化趋势, 不宜直接作为具体矿井沉降量或破坏范围的定量预测。

关键词

断层, 倾斜煤层, 回填开采, 围岩响应, 垂向位移, 塑性区, FLAC3D, 参数敏感性

Comparative Study on Surrounding Rock Response of Inclined Coal Seam Excavation with and without Backfilling near a Fault

Aoxiang Liang

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

文章引用: 梁翔翔. 断层邻近倾斜煤层开挖回填与不回填围岩响应对比研究[J]. 矿山工程, 2026, 14(5): 1209-1221.

DOI: 10.12677/me.2026.145119

Abstract

A three-dimensional numerical model containing the hanging wall, a weakened fault zone and the footwall was established to examine the influence of goaf backfilling on an inclined coal seam near a fault. Excavation without backfilling and excavation with immediate backfilling were simulated during a 12-step advance from $x = 190$ m to $x = 310$ m at a step length of 10 m. For the Step-12 backfill case, one-factor-at-a-time perturbations of $\pm 20\%$ were applied to the surrounding-rock elastic modulus, surrounding-rock cohesion and tensile strength, fault-zone strength parameters and equivalent overburden load. At Step 12, backfilling reduced the maximum subsidence from 2936.85 mm to 64.16 mm and the number of plastic elements from 870 to 95, while the peak vertical compressive stress increased from 19.03 MPa to 25.65 MPa as the backfill participated in load transfer. All three response indices were most sensitive to the equivalent overburden load. The mechanical parameters were adopted from the existing FLAC3D input files but were not independently calibrated using site-specific laboratory tests, RMR/Q classification or *in-situ* stress measurements. The results are therefore interpreted as relative responses and parameter trends rather than direct quantitative predictions for a specific mine.

Keywords

Fault, Inclined Coal Seam, Backfill Mining, Surrounding-Rock Response, Vertical Displacement, Plastic Zone, FLAC3D, Parameter Sensitivity

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

煤层开采过程中, 断层构造往往是影响围岩稳定和矿压显现的重要地质因素[1]-[6]。断层带及其邻近围岩受构造作用影响, 岩体完整性较差, 强度和变形参数与两盘完整岩层存在差异。当工作面向断层邻近区域推进时, 采动应力重新分布、顶板下沉和断层弱化带变形破坏可能相互叠加, 使采场围岩响应更加复杂[7] [8]。

回填开采通过在采空区内构筑回填体, 为上覆岩层提供支承, 可在一定程度上减小覆岩移动, 并改变采空区周围的荷载传递路径。与仅开挖不回填工况相比, 回填工况下采空区不再完全失去承载能力, 顶板下沉、工作面前方支承压力以及断层邻近区塑性破坏均可能发生变化[9] [10]。

已有研究已从断层邻近开采、回填减沉和采动应力演化等方面开展了较多讨论, 但在同时考虑断层弱化带、倾斜煤层空间形态、工作面分步推进及采空区回填条件时, 围岩响应的对比分析仍相对不足[11]-[17]。尤其在倾斜煤层模型中, 若简单采用固定高程范围进行开挖, 容易造成开挖区域与真实煤层空间形态不一致, 进而影响结果解释。为此, 建立含上盘、断层带、下盘及倾斜煤层的三维数值模型, 采用煤层分组与推进范围共同限定开挖区域, 设置仅开挖不回填和边开挖边回填两种工况, 重点对比工作面推进过程中垂向应力、垂向位移和塑性区发育特征。由于模型未设置断层接触面, 研究不讨论断层面滑移和活化判据, 结果主要用于模型条件下两种开采工况的差异分析。

2. 数值模型建立

2.1. 模型几何与构造概化

根据断层邻近煤层赋存特征建立三维数值模型。模型尺寸为 $500\text{ m} \times 400\text{ m} \times 300\text{ m}$ ，其中 x 方向为工作面推进方向， y 方向为工作面面长方向， z 方向为垂向。模型划分为上盘、断层带和下盘三个构造区。断层倾角为 70° 、倾向为 270° ，断层带宽度约 10 m ；煤层厚度约 10 m ，倾角约 4° ，倾向主要沿 y 方向。因此，在 $y = 200\text{ m}$ 的 x - z 中线剖面上，煤层呈近水平展布，而在 y - z 剖面上表现为倾斜。工作面沿 x 方向推进。

为表征断层两盘错动和煤层空间差异，上、下盘岩层分别进行分层赋值。开挖范围仅限于断层上盘煤层，下盘煤层不纳入开采区，以突出断层邻近上盘煤层的采动响应。

模型采用规则块体网格划分， x 方向按 $0 \sim 120\text{ m}$ 、 $120 \sim 420\text{ m}$ 和 $420 \sim 500\text{ m}$ 分段，网格尺寸分别约为 10 m 、 5 m 和 10 m ； y 方向在 $80 \sim 320\text{ m}$ 范围内加密，工作面及邻近区域网格尺寸约为 $5 \sim 10\text{ m}$ ； z 方向网格尺寸约为 5 m 。模型网格规模约为 $80 \times 42 \times 60$ ，共约 201,600 个单元，网格尺寸和规模均依据 FLAC3D 基础模型输入文件确定。煤层和断层带在规则网格中通过分组识别，未设置非结构化局部加密，因此塑性单元数仅用于同一网格体系下的工况对比。模型三维结构见图 1(a)， $y = 200\text{ m}$ 中线 x - z 剖面及推进范围见图 1(b)。

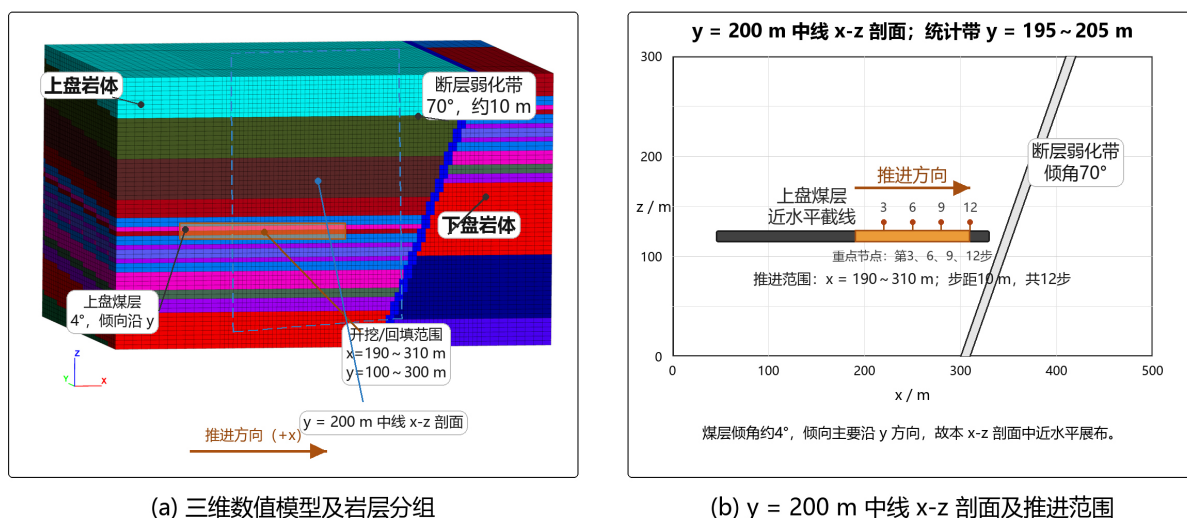


Figure 1. Schematic diagram of numerical model and advancing scheme

图 1. 数值模型及推进方案示意图

2.2. 本构模型与力学参数

模型采用 Mohr-Coulomb 弹塑性本构。剪切强度按 $\tau_f = c + \sigma \tan \varphi$ 确定，其中 c 为黏聚力、 φ 为内摩擦角；当最小主应力达到抗拉强度时发生拉伸屈服。弹性阶段由弹性模量 E 和泊松比 ν 控制。该本构能够描述开挖卸荷后的剪切与拉伸破坏，但不包含峰后软化、节理张开和循环损伤。断层破碎带采用低模量、低强度弱化单元表示，其参数与完整岩层保持明显差异。

表 1 所列煤层、各岩层及断层弱化带的密度、弹性模量 E 、泊松比 ν 、黏聚力 c 、内摩擦角 φ 和抗拉强度均取自原始 FLAC3D 建模文件，回填体参数取自及时回填工况输入文件。上述数值为原模型采用的等效岩体参数，尚未结合岩样力学试验、RMR/Q 岩体分级及现场监测结果进行校核或反演，因而不作为

特定矿井的实测参数使用。为考察关键参数取值不确定性的影响，以第 12 步回填工况为基准，对围岩弹性模量、围岩黏聚力及抗拉强度、断层弱化带强度参数和等效上覆荷载分别开展±20%的单因素扰动分析。

Table 1. Mechanical parameters of rock mass and backfill material

表 1. 岩体及回填体力学参数

岩性/材料	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa
煤层	1680	4.9	0.32	1.1	30	0.8
泥岩	2350	6.7	0.26	0.5	22	0.3
粉砂岩	2460	4.3	0.20	1.3	28	0.7
中砂岩	2580	4.8	0.21	0.7	24	0.5
细砂岩	2540	5.2	0.24	0.7	21	0.5
粉细砂岩	2560	4.9	0.25	0.8	27	0.6
三灰	2690	4.0	0.24	1.6	30	0.7
石下灰	2740	4.0	0.23	0.6	23	0.4
奥灰	2800	6.5	0.23	4.0	35	1.8
岩层 1	2510	5.6	0.26	1.6	29	1.3
岩层 2	2530	5.3	0.25	0.8	27	1.3
岩层 3	2510	4.0	0.24	1.6	30	0.7
断层带	1800	1.8	0.16	0.2	13	0.1
回填体	2000	1.0	0.25	0.5	25	0.2

注：岩层 1、岩层 2、岩层 3 为模型概化岩层；参数来源及适用范围见正文。

2.3. 边界条件与初始应力

模型底部约束 x 、 y 、 z 三个方向位移，四周侧向边界约束法向位移，顶部施加垂向附加应力。计算中考虑重力作用，并通过初始应力场模拟原岩应力状态。初始平衡后清零位移和速度，再开展分步开挖与回填计算。两组工况均从同一初始平衡模型开始计算，以保证除采空区是否回填外，其余模型几何、材料参数、边界条件和初始应力条件保持一致。

基础模型输入文件中，垂向初始应力按 $\sigma_{zz} = -18.5 + 0.025z$ (MPa) 设置，水平应力取 $\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = 0.5\sigma_{zz}$ ；在 $z = 300$ m 顶部施加 -11 MPa 压应力，使边界荷载与顶部初始应力相容。其中， $K_0 = 0.5$ 为初始侧压系数，用于确定水平初始应力与垂向初始应力的比例；其取值会影响断层弱化带的法向应力水平。初始模型按力学不平衡比 1×10^{-5} 求解，开挖与回填步采用 2×10^{-4} ；两种基准工况使用相同的初始应力场和收敛准则。这些设置均源于基础模型与工况计算文件。由于缺少现场地应力测试和实际埋深标定，参数化计算仅以顶部压应力等效表征上覆荷载变化，不直接等同于真实埋深变化。

为检验主要参数取值对计算结果的影响，后续计算在第 12 步回填基准工况基础上开展单因素扰动分析；未扰动参数、网格、推进范围、回填方式及统计窗口均保持不变。

2.4. 模型假设与适用范围

为比较两种采空区支承条件下的围岩响应，模型对实际工程条件作了适当概化。断层采用有限宽度的弱化带表示，以反映破碎带岩体强度降低对采动响应的影响。模型未设置断层接触面单元，故不涉及

真实断层面的滑移量、错动量及活化判据。

回填工况假定开挖后及时赋予回填体参数，未考虑现场回填滞后、回填体压实过程、充填接顶率、早期强度增长及渗流作用。相关结论主要适用于对比不同采空区支承条件下围岩响应的相对变化，不宜直接外推为具体矿井的定量预测结果。

3. 开挖与回填计算方案

3.1. 倾斜煤层开挖范围控制

工作面布置于断层上盘煤层中，沿 x 方向由远离断层区域向断层邻近区推进。工作面面长方向为 y 方向，开挖宽度取 $y = 100\sim 300\text{ m}$ ，即 200 m 。模型 y 方向总宽度为 400 m ，工作面两侧各保留约 100 m 边界缓冲区。

由于煤层倾角约为 4° ，若采用固定高程范围控制开挖，将不能准确反映倾斜煤层真实空间形态。计算中采用煤层分组、上盘范围、推进范围和工作面宽度共同限定开挖区域，推进过程中仅改变每一步的 x 方向范围。该处理方式能够使开挖区域随煤层倾斜形态变化。

3.2. 推进方案

综合断层位置、煤层倾角和模型边界条件，工作面由远离断层区域向断层邻近区推进，终采位置位于断层附近，未实施大范围过断层开采。推进起点为 $x = 190\text{ m}$ ，终点为 $x = 310\text{ m}$ ，单步推进距离 10 m ，共推进 12 步，累计推进 120 m 。

其中，第 3 、 6 、 9 、 12 步作为推进过程中的重点统计节点，用于对比应力、位移和塑性区随推进距离的变化，如表 2 所示。

Table 2. Stepwise advancing scheme of the working face
表 2. 工作面分步推进方案

推进步	x 方向范围/m	y 方向范围/m	累计推进距离/m
1	190~200	100~300	10
2	200~210	100~300	20
3	210~220	100~300	30
4	220~230	100~300	40
5	230~240	100~300	50
6	240~250	100~300	60
7	250~260	100~300	70
8	260~270	100~300	80
9	270~280	100~300	90
10	280~290	100~300	100
11	290~300	100~300	110
12	300~310	100~300	120

3.3. 计算工况

为对比回填对断层邻近倾斜煤层开采围岩响应的影响，设置两种计算工况。工况 A 为仅开挖不回填：

每步推进时，将当前推进范围内上盘煤层单元设为空单元，计算平衡后保存该步结果。工况 B 为边开挖边回填：每步推进时，先移除当前推进范围内煤层，再将该范围赋予回填体材料参数，计算平衡后保存结果，如表 3 所示。

Table 3. Calculation conditions of excavation and backfilling
表 3. 开挖与回填计算工况设置

工况	处理方式	对比目的
A: 仅开挖不回填	当前推进范围内上盘煤层设为空单元	反映采空区失去支承条件下围岩响应
B: 边开挖边回填	当前推进范围开挖后赋予回填体参数	分析回填体支承对围岩响应的影响

3.4. 结果提取指标

结果提取包括垂向应力、垂向位移和塑性区三类指标。云图分析选取第 12 步完成后 $y = 200\text{ m}$ 工作面中线处的 x - z 垂直剖面；数值指标统计范围为 $x = 180\sim 330\text{ m}$ 、 $y = 195\sim 205\text{ m}$ 、 $z = 60\sim 160\text{ m}$ 的三维统计带。第 3、6、9、12 步作为等间距推进过程统计节点。FLAC3D 中压应力取负值，文中峰值垂向压应力均以其绝对值表示； z 轴向上为正，最大下沉量取统计范围内垂向位移最小值的绝对值。塑性单元数按统计带内 $\text{zone.state}(z,\text{true}) \neq 0$ 的非空单元计数，包括当前屈服和历史屈服标志，仅用于相同网格条件下的工况对比，如表 4 所示。

Table 4. Result extraction indices and statistical locations
表 4. 结果提取指标及统计位置

指标	变量	统计位置	用途
垂向应力	stress-zz	三维统计带	应力重分布
垂向位移	displacement-z	三维统计带	顶板下沉
塑性区	plastic state	三维统计带	破坏范围

3.5. 参数化计算方案

采用一次一因素法开展参数化计算，基准为第 12 步及时回填工况。围岩弹性模量整体乘以 0.8 和 1.2；围岩黏聚力与抗拉强度同步乘以 0.8 和 1.2，内摩擦角保持不变；断层带黏聚力、内摩擦角和抗拉强度同步乘以 0.8 和 1.2；模型顶部压应力由 -11 MPa 调整为 -8.8 MPa 和 -13.2 MPa ，仅用于等效表征上覆荷载变化，不作为真实埋深的直接换算。回填体参数不参与扰动，以便识别围岩与断层参数的独立影响。

每个扰动工况均由同一 `fault_base.sav` 恢复，修改参数后先按 1×10^{-5} 重新平衡并清零位移和塑性状态，再按 2×10^{-4} 完成 12 步开挖回填。以基准响应 Y^0 及 $\pm 20\%$ 工况响应 Y^- 、 Y^+ 计算归一化敏感性系数

$$s = \frac{Y^+ - Y^-}{Y^0} \cdot 0.40; \quad |S| \text{ 越大, 说明相应指标对该参数组越敏感. 统计区与基准工况完全一致.}$$

4. 模拟结果分析

4.1. 开挖回填对垂向应力分布的影响

垂向应力是反映煤层开挖后上覆岩层荷载重新分布的重要指标。计算后提取 $y = 200\text{ m}$ 中线剖面结果，如图 2 所示：对比仅开挖与回填两种工况下工作面推进过程中的垂向压应力变化，如图 3 及表 5 所示。

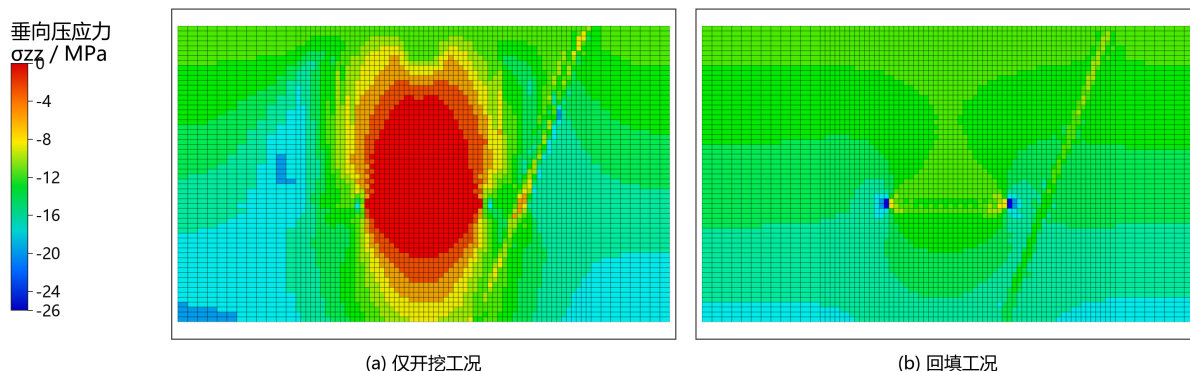


Figure 2. Comparison of vertical stress distribution on the $y = 200$ m section under two conditions at Step 12: (a) excavation only; (b) backfill condition

图 2. 第 12 步两种工况下 $y = 200$ m 剖面垂向应力分布对比: (a) 仅开挖工况; (b) 回填工况

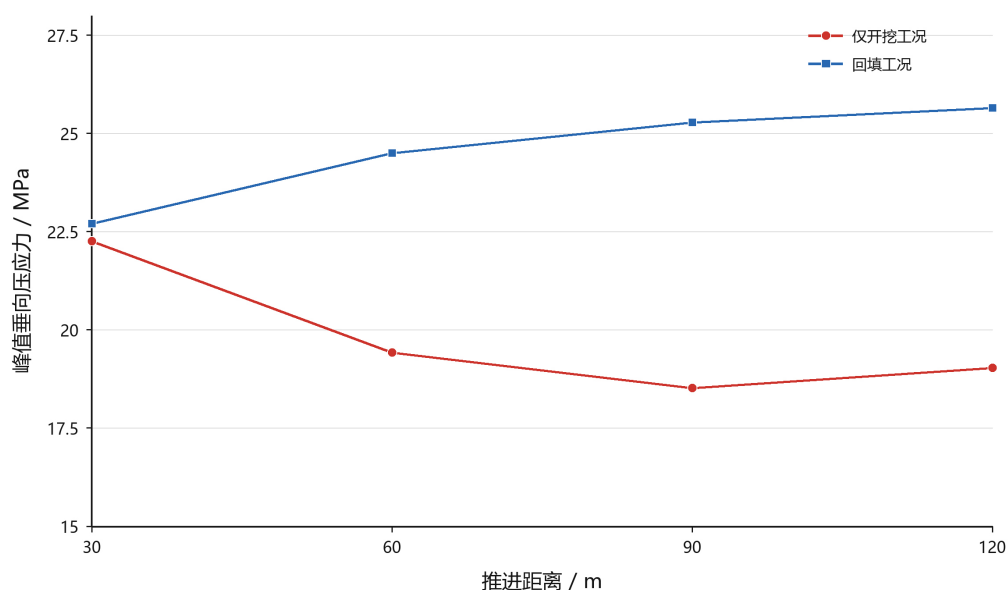


Figure 3. Variation of peak vertical compressive stress with advancing distance

图 3. 峰值垂向压应力随推进距离变化

Table 5. Comparison of peak vertical compressive stress at different advancing steps

表 5. 不同推进步峰值垂向压应力对比

推进步	推进距离/m	仅开挖峰值垂向压应力/MPa	回填峰值垂向压应力/MPa	变化率/%
3	30	22.26	22.70	+1.99
6	60	19.43	24.50	+26.08
9	90	18.52	25.28	+36.50
12	120	19.03	25.65	+34.77

注: 峰值垂向压应力取三维统计带内 σ_{zz} 最小值的绝对值; 变化率为回填工况相对于仅开挖工况的变化。

图 2 显示, 仅开挖工况下采空区及其上覆岩层出现明显卸荷和应力重分布, 采场两帮及断层邻近区存在局部应力集中。回填后, 采空区应力分布趋于连续, 统计范围内峰值垂向压应力高于仅开挖工况,

说明回填体参与了上覆荷载传递。峰值应力升高并不等同于围岩稳定性提高，仍需结合位移和塑性区响应综合判断。

4.2. 开挖回填对垂向位移的影响

垂向位移主要反映采空区顶板下沉及上覆岩层移动特征。取 $y = 200\text{ m}$ 中线剖面垂向位移云图，如图 4 所示；并对顶板附近最大下沉量进行统计，如图 5 及表 6 所示。

图 4 显示，仅开挖工况下采空区顶板失去支承后发生明显下沉，最大下沉区主要位于采空区上方及邻近顶板；回填工况下，回填体限制了顶板向采空区移动，整体位移明显减小。仅开挖工况的大变形反映采空区完全失去支承后的理想化响应，其数值受采高、顶板参数、边界条件、空单元处理方式及收敛准则影响，不宜与现场实测沉降直接对应。因此，分析重点在于两种工况之间的相对差异。其中，97.82%的减沉幅度对应及时、完全接顶且未考虑回填体压实的理想化模型条件，不代表现场可直接达到相同控制效果。

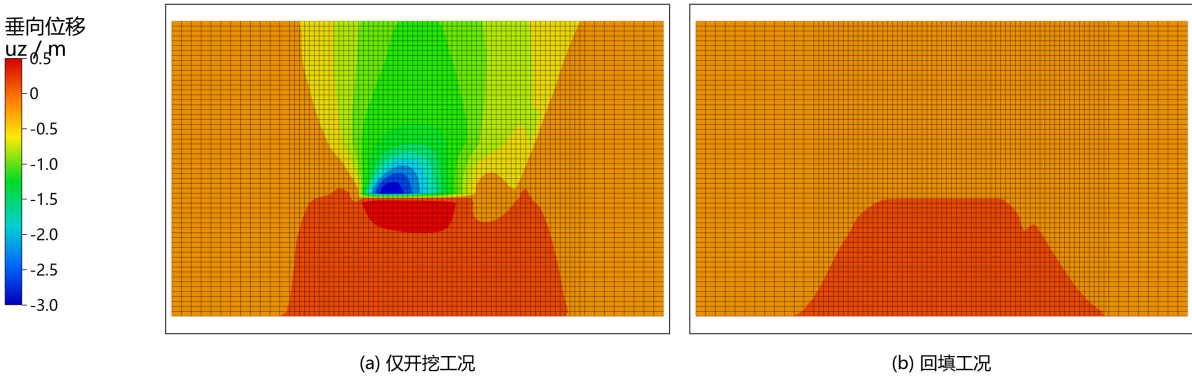


Figure 4. Comparison of vertical displacement distribution on the $y = 200\text{ m}$ section under two conditions at Step 12: (a) excavation only; (b) backfill condition

图 4. 第 12 步两种工况下 $y = 200\text{ m}$ 剖面垂向位移分布对比：(a) 仅开挖工况；(b) 回填工况

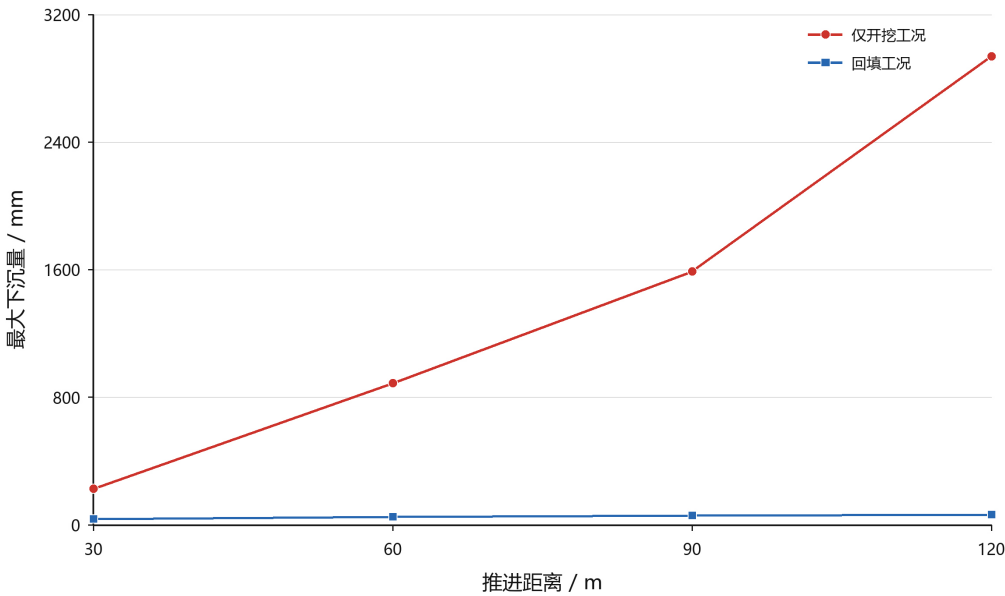


Figure 5. Variation of maximum subsidence with advancing distance

图 5. 最大下沉量随推进距离变化

Table 6. Comparison of maximum subsidence at different advancing steps
表 6. 不同推进步最大下沉量对比

推进步	推进距离/m	仅开挖最大下沉量/mm	回填最大下沉量/mm	降低率/%
3	30	225.26	38.16	83.06
6	60	889.28	50.51	94.32
9	90	1589.38	57.98	96.35
12	120	2936.85	64.16	97.82

注：最大下沉量取三维统计带内 uz 最小值的绝对值；降低率为回填工况相对于仅开挖工况的降低幅度。

4.3. 开挖回填对塑性区发育的影响

塑性区发育范围能够反映开挖扰动下围岩破坏程度。分析中重点对比两种工况下采空区顶板、采场两帮及断层邻近区域的塑性区分布，并统计相同网格条件下的塑性单元数，塑性区如图 6 所示，塑性单元数如表 7 所示。

图 6 显示，仅开挖工况下塑性区主要发育于采空区上覆岩层、采场两帮及断层邻近区，局部呈连续扩展；回填工况下，塑性区主要局限于采场边界和断层局部，发育范围明显减小。塑性单元数可用于同一网格条件下的工况对比，但其绝对值受网格尺寸、局部加密方式和塑性判据输出方式影响。进一步定量评价时，可采用塑性区面积、体积或体积分数进行归一化表征。

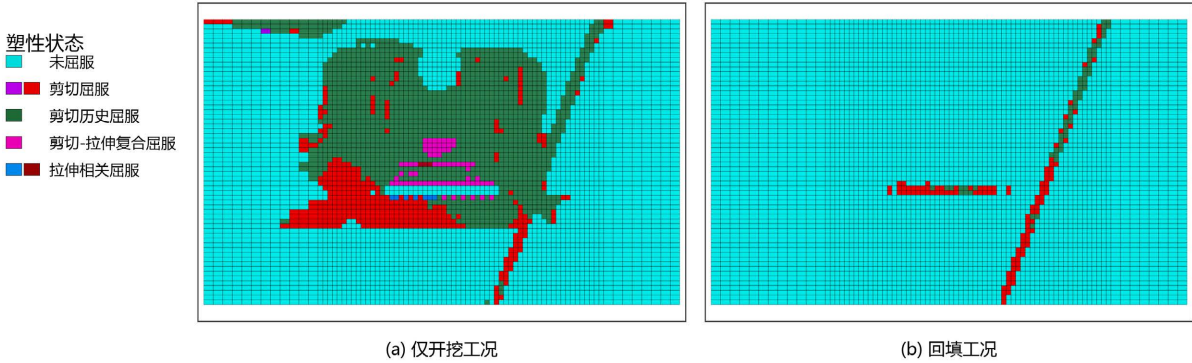


Figure 6. Comparison of plastic zone distribution on the $y = 200$ m section under two conditions at Step 12: (a) excavation only; (b) backfill condition

图 6. 第 12 步两种工况下 $y = 200$ m 剖面塑性区分布对比：(a) 仅开挖工况；(b) 回填工况

Table 7. Comparison of plastic zone development at different advancing steps
表 7. 不同推进步塑性区发育范围对比

推进步	推进距离/m	仅开挖塑性单元数/个	回填塑性单元数/个	降低率/%
3	30	273	25	90.84
6	60	694	45	93.52
9	90	894	71	92.06
12	120	870	95	89.08

注：塑性单元数为三维统计带内具有当前或历史屈服标志的非空单元数量。仅开挖工况塑性区主要分布于采空区顶板、两帮及断层邻近区；回填工况主要局限于采场边界和断层局部。

5. 讨论

5.1. 回填体支承作用及围岩响应机理

仅开挖时，煤层原承载区域转变为卸荷采空区，上覆荷载由原有煤岩柱向采场两帮、工作面前方及断层邻近区转移。依据关键层控制理论，上覆较坚硬岩层可视为承担和传递荷载的结构层；煤层开采后，其有效跨距增大，弯曲下沉及端部剪切作用随推进增强。由于未按厚度—刚度判据识别具体关键层，讨论中仅采用“等效承载层”概念解释数值结果，不据此判定现场关键层位置[18]。在 $K^0=0.5$ 的初始应力条件下，水平初始应力小于垂向初始应力，采空区顶板更易向下弯曲，卸荷边界与断层弱化带附近形成较大的应力梯度。

及时回填后，荷载传递路径由“顶板—两帮/煤壁—底板”转变为“顶板—回填体—底板”与两帮承载并存。回填体的刚度和强度虽低于完整岩层，但可缩短顶板有效悬跨并限制层间离层。第 12 步峰值垂向压应力由 19.03 MPa 增至 25.65 MPa，最大下沉量和塑性单元数分别降低 97.82%和 89.08%。上述变化说明，峰值应力增加主要与回填体受力和荷载路径重建有关，并不意味着围岩失稳风险同步增大。塑性区也由仅开挖工况下采空区上覆岩层、两帮及断层邻近区的大范围分布，转变为回填工况下采场边界和断层局部的受限分布。

5.2. 断层弱化带对围岩响应的影响

断层弱化带的 E 、 c 和 φ 分别为 1.8 GPa、0.2 MPa 和 13° ，低于多数完整岩层。依据 Mohr-Coulomb 强度准则，较低的黏聚力和内摩擦角会削弱相同法向应力条件下的抗剪能力，使断层邻近区成为采动应力重分布中的优先屈服部位。仅开挖时，顶板弯曲下沉与两帮集中承载促使采场周边剪切及复合屈服区向弱化带扩展并局部贯通；回填后，顶板位移和采空区卸荷幅度减小，连续塑性区明显收缩，主要分布于采场边界和断层局部。模型未设置断层接触面单元，因此上述结果仅反映破碎带强度弱化及塑性破坏迁移，不能用于表征真实断层面的滑移量或活化程度。

5.3. 关键参数敏感性

第 12 步回填工况的参数化结果见表 8。四组参数扰动采用相同的网格、统计区和推进过程，基准响应为峰值垂向压应力 25.65 MPa、最大下沉量 64.16 mm 和塑性单元数 95 个。各扰动工况均达到规定的收敛标准。

Table 8. Responses of the Step-12 backfill case under $\pm 20\%$ parameter perturbations

表 8. 第 12 步回填工况关键参数 $\pm 20\%$ 扰动响应

参数组	-20%峰值 应力/MPa	+20%峰值 应力/MPa	-20%下沉 量/mm	+20%下沉 量/mm	-20%塑性 单元/个	+20%塑性 单元/个
围岩弹性模量	24.62	26.49	66.16	62.27	94	124
围岩黏聚力及抗拉强度	25.35	25.94	63.85	64.60	101	94
断层带强度参数	26.06	25.64	65.53	64.03	96	92
等效上覆荷载	22.17	29.32	54.25	75.49	74	266

注：表中“-20%”和“+20%”为相对基准参数的扰动；上覆荷载对应模型顶部压应力-8.8 MPa 和-13.2 MPa。参数扰动采用一次一因素法，不表示现场参数的上下限。

峰值垂向压应力、最大下沉量和塑性单元数对等效上覆荷载的敏感性均最高，归一化敏感性系数绝对值分别为 0.70、0.83 和 5.05。围岩弹性模量增大后，下沉量减小，但局部塑性单元数因刚度差异引起的应力集中而增加；断层带强度变化主要影响弱化带附近的屈服分布；上覆荷载增大则使垂向应力水平、下沉量和塑性单元数同步增加。在 $\pm 20\%$ 扰动范围内，回填减沉趋势未发生改变，但峰值应力和塑性单元数的绝对值仍受参数组合影响。塑性单元数属于离散计数指标，其 $|S| = 5.05$ 表明该指标对上覆荷载扰动响应强烈，但不宜与连续型应力、位移指标作同精度解释，如图 7 所示。

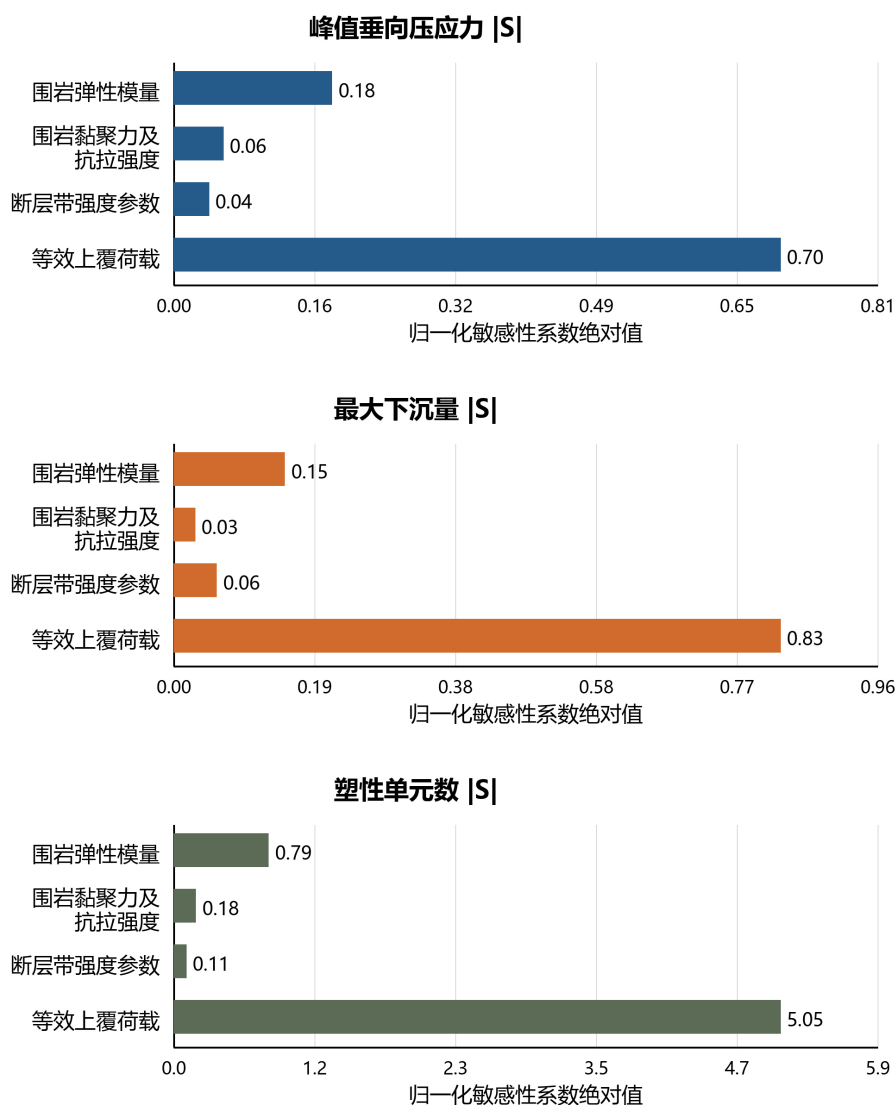


Figure 7. Normalized sensitivity coefficients of key parameters

图 7. 关键参数归一化敏感性系数

5.4. 模型局限性与后续改进

模型参数与计算条件仍存在一定局限。表 1 参数源于既有建模文件，尚未结合矿井岩样试验、RMR/Q 分级、地应力测试和矿压监测进行联合校准， $\pm 20\%$ 单因素分析只能反映局部变化趋势，不能替代多参数反演。岩体采用理想弹塑性 Mohr-Coulomb 本构，未考虑峰后软化、节理裂隙和时间效应；断层被概化为

连续弱化带,未设置接触面单元;回填过程按及时、完全接顶处理,未考虑回填滞后、接顶率、压实、强度增长及渗流耦合作用。

若用于工程定量预测,应以现场试验和监测反演参数,并进一步开展回填体模量与强度、侧压系数、断层接触面刚度/强度、回填滞后和推进速度的多因素耦合分析;塑性单元数也应与塑性区面积、体积或体积分数相互校核。

6. 工程启示

对于类似断层邻近倾斜煤层工作面,回填开采可作为围岩控制方案之一。参数化计算表明,方案设计除关注回填体承载能力外,还应核查上覆荷载水平、顶底板等效模量与强度以及断层破碎带强度;这些参数分别影响工作面承载水平、顶板下沉和塑性破坏位置。工程应用中,应结合断层位置、落差、破碎带宽度、含水性、回填材料强度、充填接顶率和矿压监测资料综合判断。

当工作面推进至断层邻近区前,宜加强断层探查、顶板离层观测、工作面前方压力监测及回填质量检查。相关方案仍需结合现场条件验证,不宜仅依据单一数值模型结果直接作出施工决策。

7. 结论

(1) 建立了含上盘、断层带、下盘及倾斜煤层的三维数值模型,模型尺寸为 $500\text{ m} \times 400\text{ m} \times 300\text{ m}$,断层倾角为 70° ,煤层倾角约为 4° 。针对倾斜煤层空间形态,采用煤层分组、上盘范围、推进范围和工作面宽度共同限定开挖区域,可避免固定高程范围开挖与倾斜煤层实际空间形态不一致的问题。

(2) 在该模型条件下,工作面沿 x 方向由 190 m 推进至 310 m ,设置仅开挖不回填和边开挖边回填两种工况。结果显示,仅开挖工况下采空区失去支承后,顶板下沉和塑性区扩展较明显,塑性区主要分布于采空区上覆岩层、两帮及断层邻近区域。

(3) 与仅开挖工况相比,及时回填恢复了“顶板-回填体-底板”荷载传递路径。第12步最大下沉量由 2936.85 mm 降至 64.16 mm ,降低 97.82% ;塑性单元数由 870 个降至 95 个,降低 89.08% 。塑性区由仅开挖工况下采空区上覆岩层、两帮及断层邻近区的较大范围分布,收缩至回填工况下的采场边界和断层局部。

(4) 与仅开挖工况相比,第12步回填工况的峰值垂向压应力由 19.03 MPa 增至 25.65 MPa ,反映回填体参与了上覆荷载传递。 $\pm 20\%$ 单因素分析表明,峰值垂向压应力、最大下沉量和塑性单元数均对等效上覆荷载最为敏感。由于模型参数尚未通过现场试验与监测反演,且未考虑断层接触滑移、回填滞后和渗流耦合,相关结论主要用于相对比较和趋势判断。

参考文献

- [1] 张奇,宣以琼.基于 $\text{FLAC}^{3\text{D}}$ 的断层对煤层回采的影响研究[J].湖北理工学院学报,2024,40(3):66-70.
- [2] 高志虎,穆国虎,高文东,等.断层不同盘位下缓倾斜煤层工作面覆岩破断与变形规律研究[J].煤炭工程,2025,57(11):141-149.
- [3] 刘雨生,孟祥瑞,程详,等.逆断层上下盘开采扰动下断层活化响应模拟研究[J].中国安全生产科学技术,2024,20(8):33-41.
- [4] 刘超.采动影响下断层活化致围岩失稳破坏机理研究[J].陕西煤炭,2025,44(7):20-25,38.
- [5] 张梦丽,詹润.厚松散层覆盖下逆冲断层倾角变化与采动活化响应模拟研究[J].中国矿业,2023,32(10):173-180.
- [6] 包苏东,刘南,付凯凯,等.深井大倾角仰采工作面过断层开采技术研究与应用[J].中国矿业,2025,34(S2):328-333.
- [7] 李浩然,杨本水.断层对煤层回采的影响模拟研究[J].四川轻化工大学学报(自然科学版),2022,35(5):87-94.
- [8] 李先平.不同因素影响下含断层构造倾斜煤层底板损伤及断层活化突水规律数值模拟研究[D].[硕士学位论文].

- 青岛: 山东科技大学, 2020.
- [9] 柳群荣, 郭忠林, 陈青松, 等. 基于 FLAC^{3D} 的分级尾砂充填治理采空区研究[J]. 矿冶, 2019, 28(1): 4-8.
- [10] 唐礼忠, 周建雄, 张君, 等. 动力扰动下深部采空区围岩力学响应及充填作用效果[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2012, 39(6): 623-628.
- [11] 王海峰, 苏成哲, 李继红, 等. 基于 FLAC^{3D} 对某铅锌矿巷道稳定性及采空区治理方案研究[J]. 甘肃冶金, 2024, 46(2): 1-4.
- [12] 闫松林. 浅埋煤层条带膏体充填置换开采技术研究[J]. 能源与节能, 2026(1): 172-175.
- [13] 王雁冰, 王健龙, 任文涛, 等. 复杂地质条件下连采连充式采煤防冲理论分析[J]. 工程科学学报, 2026, 48(3): 477-491.
- [14] 姜永丰, 房祥龙, 海龙. 歪头山尾矿库下充填开采围岩稳定性分析[J]. 化工矿产地质, 2024, 46(4): 321-328.
- [15] Zhang, P., Xu, Z., Deng, X., Zhang, Y. and Hu, X. (2026) Study on the Migration Laws of Overlying Strata in Backfill Mining of Close-Distance Coal Seams. *Processes*, **14**, Article 1448. <https://doi.org/10.3390/pr14091448>
- [16] 吴亚萍, 胡友彪, 刘瑜, 等. 深部大型断层注浆改造及数值模拟分析[J]. 煤炭技术, 2017, 36(2): 35-37.
- [17] 吴姗, 宋卫东, 杜建华, 等. 高陡边坡下充填法开采挂帮矿稳定性数值模拟与安全监测[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(6): 874-879, 885.
- [18] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林. 岩层控制中的关键层理论研究[J]. 煤炭学报, 1996, 21(3): 225-230.