

不同地形条件下工作面埋深对开采沉陷的影响

吕文婧, 吕义清*

太原理工大学 矿业工程学院, 太原 030024

[摘要] 为研究受地形条件影响下工作面埋深对开采沉陷的影响,以山西省某煤矿为工程背景,采用理论分析和 MIDAS 数值模拟相结合的方法,研究了在山区沟谷地形条件下分别开采 8[#]煤和 11[#]煤以及在平原地形条件下分别开采 8[#]煤和 11[#]煤共 4 种情况,对比分析采动过程中各模型的地表移动变形特征及覆岩应力应变特征。研究表明:(1)水平重复开采过程中两工作面形成的沉降漏斗会相互影响,开采结束后地表下沉量是由单工作面开采所引起的地表下沉量的叠加;(2)开采相同工作面时,不同地形条件对地表变形的影响程度不同;随着工作面埋深增加,地形对开采沉陷的影响减小;(3)随着煤层埋深增加,地表整体下沉的幅度减小,但在山区沟谷地形条件下,煤层埋深越深,在中间煤柱正上方地表处由采煤引起的竖向位移反而增加。研究成果可以为类似的黄土沟谷区地表保护以及地质灾害防护提供借鉴。

[关键词] 开采沉陷;地形条件;工作面埋深;MIDAS;煤矿

[分类号] P694; TD823

[文献标志码] A

The impact of working face burial depth on mining subsidence under different terrain conditions

LÜ Wenjing, LÜ Yiqing*

College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China

Abstract: To study the impact of the working face depth on mining subsidence under the influence of different terrain conditions, a coal mine in Shanxi Province was taken as the engineering background. A combination of theoretical analysis and MIDAS numerical simulations was used to study four situations: separately mining 8[#] and 11[#] coal under mountainous valley terrain conditions, and under plain terrain conditions. The surface movement and deformation characteristics, as well as the overlying rock stress-strain characteristics of each model during the mining process, were compared and analyzed. The results indicate that the settlement funnel formed by two working faces during repeated horizontal mining will affect each other, and the surface subsidence after mining is the superposition of the surface subsidence caused by single working face mining. When mining the same working face, the impact of different terrain conditions on surface deformation differs, and as the depth of the working face increases, the

收稿日期: 2024-06-21; 改回日期: 2024-08-26。 责任编辑: 黄维婷。

基金项目: 山西省自然科学基金项目(2021030212411)。

第一作者: 吕文婧(1999—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 环境与灾害地质, E-mail: lwj2736457429@163.com。

*通信作者: 吕义清(1970—), 男, 副教授, 研究方向: 工程地质及环境与灾害地质, E-mail: 964917106@qq.com。

引用格式: 吕文婧, 吕义清, 2026. 不同地形条件下工作面埋深对开采沉陷的影响[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 53(1): 94—105.

Lü W J, Lü Y Q, 2026. The impact of working face burial depth on mining subsidence under different terrain conditions[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 53(1): 94—105.

influence of terrain on mining subsidence decreases. As the depth of the coal seam increases, the overall subsidence of the surface decreases. However, under the terrain conditions of mountainous valleys, as the coal seam burial depth increases, the vertical displacement caused by coal mining on the surface directly above the middle coal pillar correspondingly increases. These research results provide reference for surface protection and geological disaster prevention in similar loess valley areas.

Key words: mining subsidence; terrain conditions; working face burial depth; MIDAS; coal mine

煤炭开采对国民经济的贡献显著,2023年中国煤炭消费占能源总消费的55.3%(国家统计局,2024)。然而采空区的形成引发了地质灾害,破坏了矿区的生态地质环境(Altun et al., 2010)。山西省地处黄土高原,大多数煤矿分布在山区沟谷区域,采煤导致的地表沉陷表现出明显的不均匀性(芦家欣等,2019);同时随着浅层煤炭资源逐渐枯竭,深部煤炭开采将是国家未来的发展趋势(于广明等,2004)。因此研究不同地形条件下工作面埋深对开采沉陷的影响,对于保障矿区的安全生产和保护生态环境具有重要意义。

近年来,学者们就山区沟谷地形条件下的开采沉陷规律进行了深入研究。早期研究主要依赖于观测站(胡琪,2014;王启春等,2017)和数学统计的方法(何万龙,1983;蔡音飞等,2020),但对岩层特性的考虑相对简单,难以全面反映岩层内部的运动,因此逐渐采用物理和数值模拟等方法进行分析研究(侯恩科等,2021;伊永杰等,2023)。从位移角度分析,地表下沉曲线呈现出不对称采空区的偏态分布,且重复采动会加重这一现象(董灿灿等,2020)。从应力角度来看,浅层煤开采过程中出现的动载矿压现象主要是由于主关键层受到剥蚀所致(许家林等,2012;Zhang et al., 2012),并将开采影响区分为强烈区、明显区和微弱区(Li et al., 2016; Li et al., 2019; 杨秀宇等,2020)。此外,结合斜坡位移及应力变化总结出开采单工作面时斜坡失稳破坏的阶段(Tang, 2009; 刘志辉和吕义清,2020)。综上,现有研究主要聚焦于浅层煤或两层煤的重复采动效应,而对各单层煤开采沉陷的比较分析仍显不足。

同时许多学者对不同煤层埋深条件下的开采沉陷规律进行了大量研究。通过观测站和数学统计的方法分析开采单工作面时地表沉陷特征,发现深部开采会使采煤活跃期变短、最大下沉速度滞后角变小(邓伟男,2022)、下沉系数减小(高均海和白国良,2016)以及煤壁压缩值直线

上升(彭林军等,2011),并为深部开采地表移动预测提供了计算方法(邓喀中等,2000)。采用数值模拟等方法研究表明:在平原地区,煤层埋深越深,开采沉陷对地表的扰动程度越小(刘谨等,2007),地表下沉系数也变小(陈勇,2010;刘义新等,2013),研究还指出远离工作面的煤柱呈现出不同程度的压缩变形(于保华等,2007)。然而这些研究主要集中在平原地区,尚未将地形地貌因素纳入综合分析。在实际采矿工程中,由地下开采引起的地表变形程度受到多种因素的影响,其中地形条件和工作面埋深作为2个关键因素,两者相互耦合作用对开采沉陷的影响相关研究分析还不充分,地表变化规律尚不明确。

因此,本文以山西省某煤矿为工程背景,基于MIDAS软件模拟了在山区沟谷地形条件下分别开采8[#]煤和11[#]煤以及在平原地形条件下分别开采8[#]煤和11[#]煤共4种情况,对比分析在工作面埋深不同的情况下,地形对开采沉陷的影响程度以及在2种地形条件下,工作面埋深对开采沉陷的影响,为类似的黄土沟谷区地表保护以及地质灾害防护提供借鉴。

1 研究区概况

研究区位于晋西北部黄土高原一带,属于中低山丘陵区,地表经过长期风化剥蚀,沟谷纵横交错,冲沟间黄土梁峁断续分布。地势南高北低,西高东低。地表大部分为第四系黄土所覆盖,冲沟中可见基岩零星出露。区域构造简单,地层产状平缓,地层倾角为2°~5°。

研究区内可采煤层为8[#]煤和11[#]煤,8[#]煤层工作面与11[#]煤层工作面垂向平行布置,工作面走向与山区沟谷走向平行,沿南北方向布置。8[#]煤层厚度为3.8~4.2 m,平均厚度为4 m,埋深为46~190 m,布置有8101和8102工作面,工作面宽165 m,长2 000 m,两工作面之间间隔70 m,于2018—2019年开采完成;11[#]煤层厚度为6.1~

7.5 m, 平均厚度为 6.8 m, 8[#]煤层与 11[#]煤层间距约为 70 m, 布置有 11301 和 11302 工作面, 工作面宽 165 m, 长 1 800 m, 两工作面间隔为 70 m, 于 2022 年开采完成。经野外调查, 在研究区域内地表出现了不同程度的塌陷(图 1)。

2 采动地质体变形特征

当煤层被采出后, 覆岩的初始应力平衡会受到破坏, 顶板岩层失去支撑而发生冒落, 上部岩体在自重作用下也开始出现弯曲下沉, 此过程迅速向上传递, 最终开采扰动波及地表, 形成地面塌陷。斜坡各区域与采空区的相对位置不同会导致不同的变形特征(汤伏全, 1989)。岩土体整

体向下运动过程中形成沉降漏斗(图 2), 在沉降漏斗两侧形成压应力集中区(如图 2 中 I、II 区域), 在压应力作用下, 两侧岩土体发生压缩变形, 导致其正上方地表出现下沉现象。

I₁、II₁ 分别为上层煤左侧、右侧压应力集中区; I₂、II₂ 分别为下层煤左侧、右侧压应力集中区; S 为区域面积。以上层煤为例, 当采空区位于斜坡下方时, 由于沟谷的存在, 沉降漏斗的形态呈现出明显的非对称性, 左右两部分的面积存在差值, II₁ 区域的面积小于 I₁ 区域, 沉降漏斗对 II₁ 区域施加的压应力小于 I₁ 区域, 导致 II₁ 区域正上方地表下沉值小于 I₁ 区域。在平原地区开采时, 沉降漏斗关于采空区中心对称,

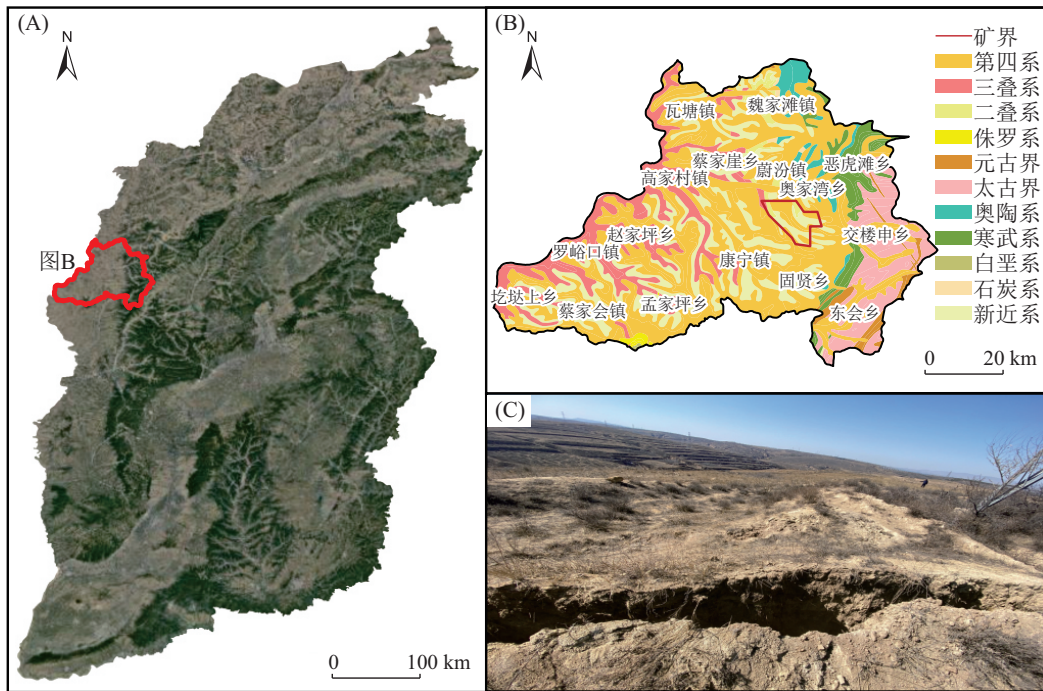


图 1 研究区地理位置图

Fig. 1 Geographical map of the study area

(A) 山西省兴县地理位置; (B) 兴县区域地质图; (C) 研究区地表现状

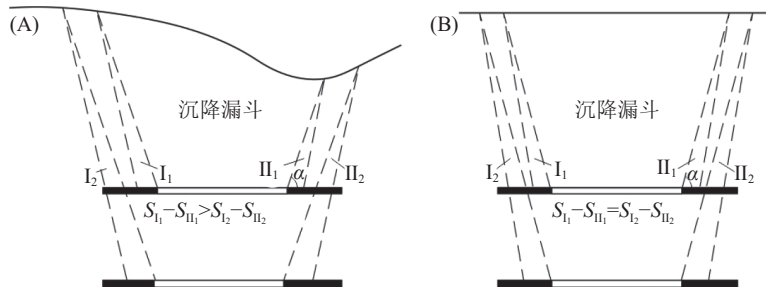


图 2 采动地质体竖向移动破坏图

Fig. 2 Vertical movement failure diagram of a mined geological body

(A) 山区沟谷地形; (B) 平原地形

I_1 区域和 II_1 区域面积相等, 沉降漏斗对两区域施加的压应力相等, 导致 II_1 区域正上方地表下沉值等于 I_1 区域的, 这说明在开采相同工作面时, 不同地形条件对地表变形的影响程度也不同。当工作面埋深越深, 沟谷对其影响越小, 两侧沉降差异减小, 即煤层埋深越深, 地形对开采沉陷的影响越小, 但具体的影响幅度需要通过数值模拟来分析研究。

3 数值模拟

3.1 计算模型

根据矿区基础地质资料, 运用有限元数值模拟软件 MIDAS GTS NX 建立三维地质模型。模型尺寸 XYZ 为 $600\text{ m} \times 600\text{ m} \times 280\text{ m}$ 。为排除地层倾角对实验结果产生影响, 将地层概化为水平地层, 其他因素保持不变。采用混合网格生成器进行自动网格划分, 设定全局目标网格尺寸为 15 m ; 对于厚度小于此尺寸的地层, 网格划分按其实际厚度控制。模型中各岩层材料特性设置为摩尔-库伦本构。模型顶部设置为自由面, 对四周及底部设置为固定约束。其中, $8^{\#}$ 煤层和 $11^{\#}$ 煤层均包含 2 个工作面, 4 个工作面编号分别为 8101、8102、11301、11302, 工作面尺寸为 $400\text{ m} \times 165\text{ m}$, 两工作

面之间留设 70 m 的煤柱, 每阶段进尺 50 m , 工作面走向与山区沟谷走向平行。为研究地形条件和煤层埋深对开采沉陷的影响, 需要构建一个对照组即平原地形条件下采煤模型, 其他条件保持不变, 共建立 4 个模型(图 3)。每个模型分析 3 种工况, 即只开采左工作面、只开采右工作面、先开采左工作面后开采右工作面。

为了监测地表竖向位移变化, 在地表每隔 15 m 布置一个监测点; 同时为了监测上覆岩层的变形特征, 从模型中间煤柱向上布置监测点至地表, 以及从模型左侧采空区顶板中心向上布置监测点至地表, 所有的数值模拟监测点沿 $Y=300\text{ m}$ 所在剖面进行布置(图 4)。

模型中各岩土层物理力学参数根据基础地质资料和以往的工程经验确定, 为简化模型, 地层按岩性自上而下划分为 14 个工程地质岩组, 具体参数见附表 1。

3.2 模拟结果可靠性验证

为了保证采煤过程中坡体的稳定性, 沿 8101、8102 工作面倾向布设 2 条观测线, 各观测线上的测点间距约为 60 m , 采用全站仪对其垂直位移进行观测, 观测线与工作面的相对位置见图 5。

模型 3 基于实际开采情况进行模拟, 因此将

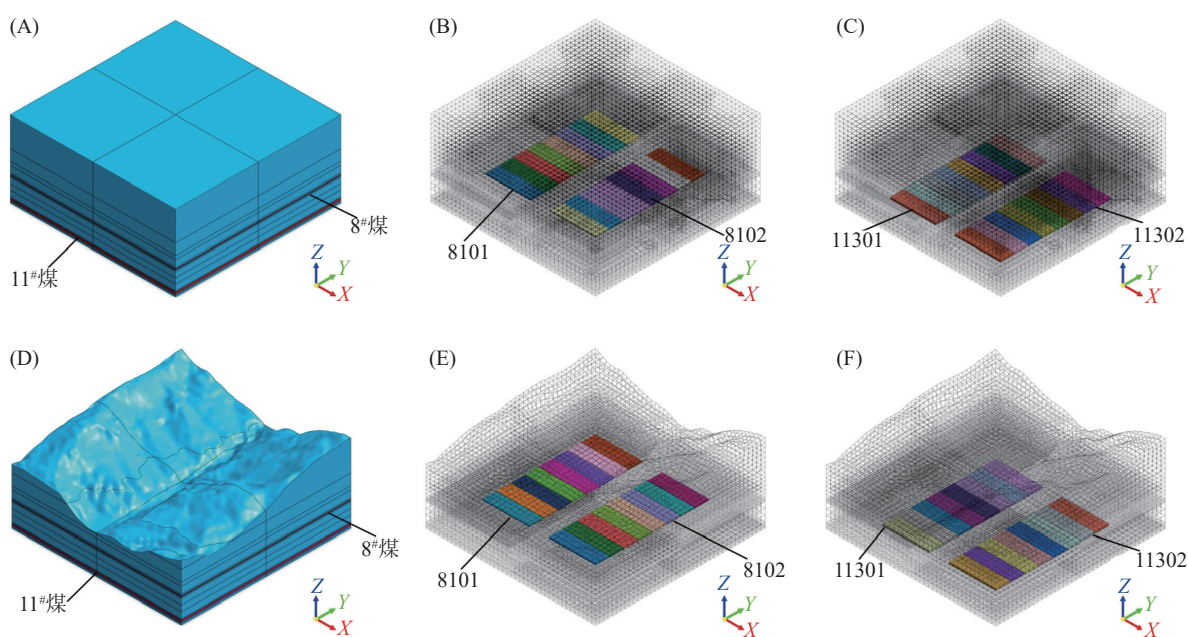


图 3 各三维地质模型图

Fig. 3 Three-dimensional geological model diagrams

(A) 平原地区采煤; (B) 模型 1(平原地区开采 $8^{\#}$ 煤); (C) 模型 2(平原地区开采 $11^{\#}$ 煤); (D) 山区沟谷采煤;
(E) 模型 3(山区沟谷开采 $8^{\#}$ 煤); (F) 模型 4(山区沟谷开采 $11^{\#}$ 煤)

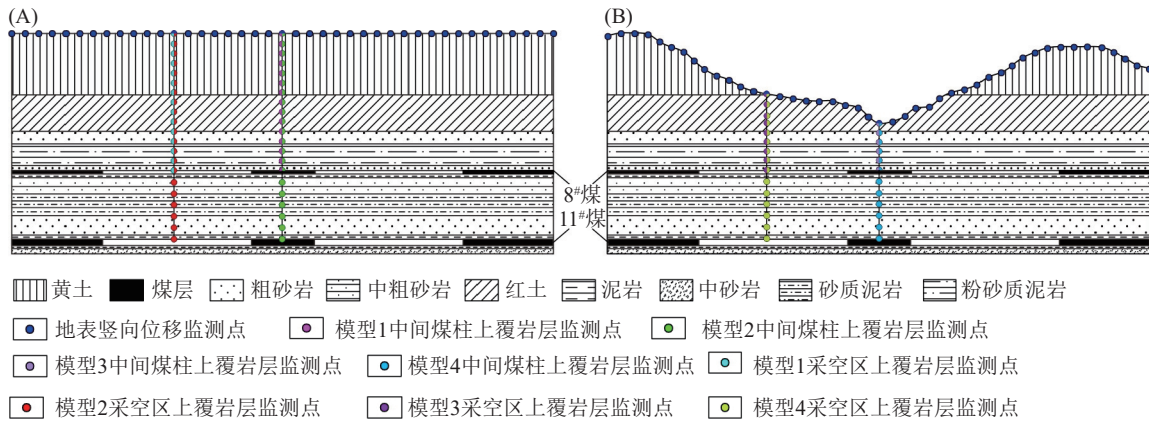


图 4 数值模拟监测点布置图(Y=300 m 地质剖面)
 Fig. 4 Layout of numerical simulation monitoring points (Y=300 m geological profile)

(A) 平原地区采煤; (B) 山区沟谷采煤

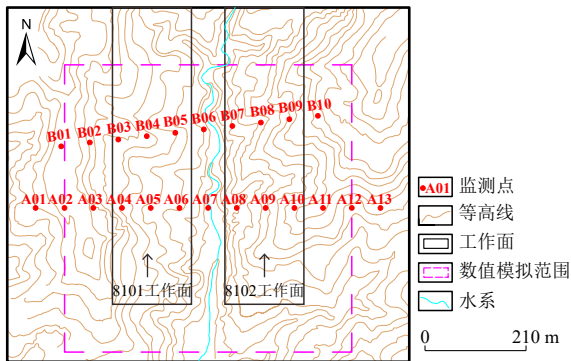


图 5 变形监测工程平面布置图
 Fig. 5 Layout of deformation monitoring points

其在 8101 工作面开采结束后的模拟结果和 2018-4-28(实际 8101 工作面开采到 400 m, 与数值模拟工作面走向长度相符)观测 A 线的下沉值进行对比分析(图 6), 结果显示下沉值的绝对误差最大为 68 mm, 位于 A05 监测点, 其相对偏差为 3.9%, 绝对误差的平均值为 34 mm。对比结果表明, 数值模拟结果和地表实测位移变化趋势基本一致: 数值模拟结果较实测值小, 因为有限元数值模拟无法模拟实际地层岩石中的节理裂隙; 此外, 数值模拟曲线因监测点密集能够更加全面的考虑受采动影响下斜坡的移动变形, 相比之下实测曲线只能提供大致的趋势。总体来看, 两者吻合度较高, 可以将模型 3 的地层分布及主要力学参数用于其他 3 个模型中进行对比分析研究。

3.3 地表位移规律

3.3.1 地表水平位移

以模型 3 为例, 选取 Y=300 m 典型剖面, 分析随工作面推进过程中水平位移变化云图(图 7)。

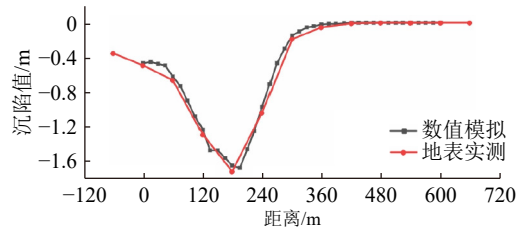


图 6 地表实测与数值模拟地表位移对比图
 Fig. 6 Comparison of surface displacement between actual measurements and the numerical simulations

在 8101 工作面开采结束后, 采空区上部岩土体失去支撑向下弯曲, 两侧的岩土体向采空区中心倾倒, 形成沉降漏斗, 漏斗左右两侧地表最大水平位移为 0.93 m 和 -0.69 m。工作面位于斜坡的下方, 斜坡受到重力的影响向坡脚发生移动, 导致 8101 工作面左侧的地表最大水平位移绝对值大于右侧。同理, 在 8102 工作面开采结束后, 工作面上方形形成新的沉降漏斗, 左右两侧地表最大水平位移为 0.46 m 和 -1.01 m, 同时对 8101 工作面上方的沉降漏斗右侧产生干涉, 最大位移减小为 -0.55 m, 说明水平重复开采时, 两工作面形成的沉降漏斗会相互影响。

3.3.2 地表竖向位移

为监测地表竖向变形, 选取 Y=300 m 典型剖面布置地表位移监测点(图 4), 对各模型开采结束后地表竖向位移情况进行研究。由此可以分析得出:

(1) 以模型 1、3 为例, 当剖面垂直两工作面走向时, 地表下沉曲线呈“W”形, 且双工作面开采引起的地表下沉值相较于叠加 2 个单工作面开采引起的地表下沉值近乎相等(图 8)。

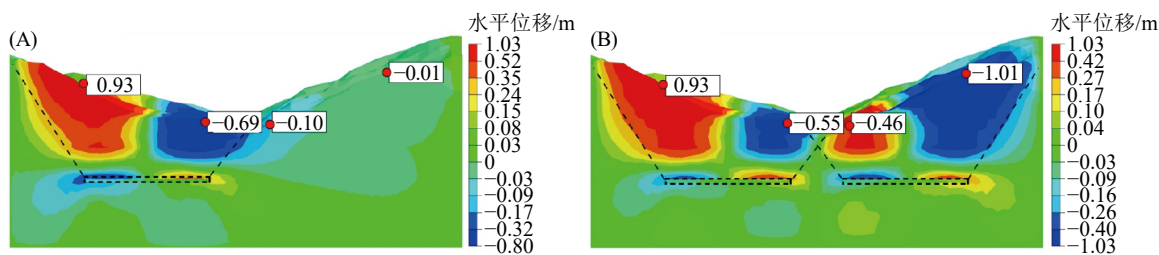


图 7 工作面推进过程中水平位移云图

Fig. 7 Horizontal displacement cloud map during the advancement of the working face

(A)8101 工作面开采结束; (B)8102 工作面开采结束

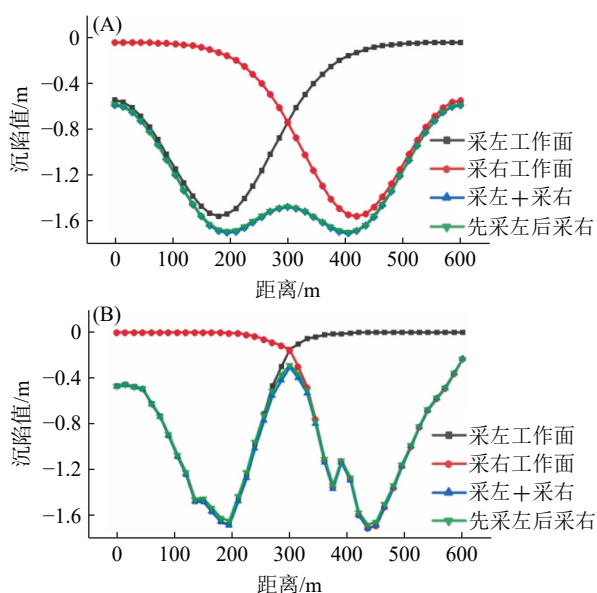


图 8 开采不同工作面地表下沉曲线图

Fig. 8 Surface subsidence for different mining faces

(A)模型 1; (B)模型 3

(2)各模型地表最大下沉值均位于采空区中心的正上方(图 9), 离采煤中心愈远下沉值愈小。在开采结束后模型 1、2、3、4 的地表最大下沉值分别为 1.69 m、0.74 m、1.68 m、0.81 m。即在不同地形条件下开采相同工作面时, 地表最大下沉值大致相等。

(3)对比模型 1、2、3、4 的沉降曲线中心点(图 9), 在山区开采 8[#]煤时地表下沉值为 0.25 m, 平原地区开采 8[#]煤时地表下沉值为 1.48 m, 两者相差 1.23 m; 而在山区开采 11[#]煤时地表下沉值为 0.59 m, 平原地区开采 11[#]煤时地表下沉值为 0.74 m, 两者相差 0.15 m。这表明在开采相同工作面时, 不同地形条件对地表变形的影响程度不同; 随着工作面埋深增加, 地形对开采沉陷的影响减小。

(4)在平原地区开采 11[#]煤引起的地表下沉值

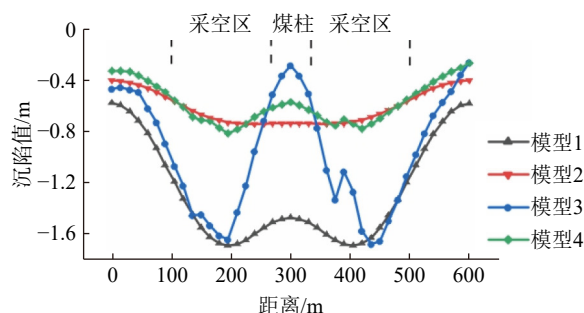


图 9 各模型地表下沉曲线图 (Y=300 m)

Fig. 9 Surface subsidence for the various models at Y=300 m

均小于开采 8[#]煤引起的; 而在山区沟谷地形条件下, 沉降盆地中心附近开采 11[#]煤引起的地表下沉值小于开采 8[#]煤引起的, 但在中间煤柱正上方附近开采 11[#]煤引起的地表下沉值反而大于开采 8[#]煤引起的(图 9)。这表明随着煤层埋深的增加, 地下开采导致地表整体下沉幅度减小, 但在山区沟谷地形条件下, 中间煤柱正上方地表处由采煤引起的竖向位移随煤层埋深增加反而增加。

3.4 覆岩应力应变规律

煤柱正上方地表的位移变化与煤柱上覆岩层的位移变化密切相关, 因此需要研究中间煤柱上覆岩层的下沉规律, 4 个模型监测点布置情况见图 4, 绘制开采结束后从模型中间煤柱至地表各监测点的竖向位移曲线(图 10)。

开采结束后, 模型 1、3 的中间煤柱顶板下沉值分别为 0.39 m、0.24 m, 两者相差 0.15 m; 模型 2、4 的中间煤柱顶板下沉值分别为 0.18 m、0.13 m, 两者相差 0.05 m。这表明在 2 种地形条件下, 开采 8[#]煤引起的中间煤柱顶板下沉差略大于开采 11[#]煤的。从图 10 中可以看出, 当煤层埋深足够深时, 无论是在山区还是平原地区, 开采同一层煤时, 中间煤柱上覆岩层的下沉趋势基本一致; 且开采 8[#]煤的中间煤柱上覆岩层下沉趋势整体

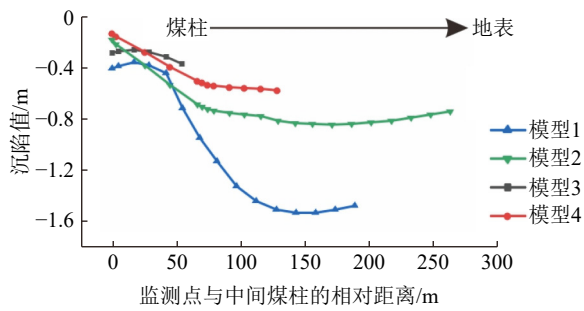


图 10 监测点竖向位移曲线

Fig. 10 Vertical displacements for different monitoring points

大于 11[#]煤,此外由于山区煤柱埋深较平原浅,导致在 2 种地形条件下,中间煤柱正上方地表处开采 8[#]煤引起的竖向位移差明显大于开采 11[#]煤引起的。即随着煤层埋深的增加,地形对开采沉陷的影响减小。

在 2 种地形条件下,开采 8[#]煤引起的中间煤柱顶板竖向位移值均大于开采 11[#]煤引起的。在从煤柱顶板到地表的过程中,模型 1 的中间煤柱上覆岩层下沉趋势整体大于模型 2,因此在平原地形条件下中间煤柱正上方地表处,开采 8[#]煤引起的地表下沉量大于开采 11[#]煤引起的地表下沉量。而山区的中间煤柱埋深较浅,导致模型 3 的上覆岩层下沉趋势小于模型 4,与平原地区的趋势相反,因此在山区沟谷地形条件下中间煤柱正上方地表处,开采 8[#]煤引起的地表下沉量小于开采 11[#]煤引起的地表下沉量。

煤柱移动变形与煤层顶板息息相关,因此需要分析模型煤层顶板的变形规律,分别在模型 1、3 的 8101 工作面中心和模型 2、4 的 11301 工作面中心顶板布置监测点(图 4)。绘制随开采阶段推进过程中监测点的竖向位移变化曲线(图 11)和最大主应力变化曲线(图 12)。

如图 11、图 12 可知,监测点处在 4、5 开采阶段的中间,随着开采 4 阶段的推进,顶板位移逐渐增大,测点位置发生变形,形成压应力集中区,应力激增,在 4 阶段结束后,压应力达到峰值;随着开采 5 阶段的推进,煤层顶板发生垮落,压应力急剧减小,应力集中区消散;随着后续开采阶段的进行,测点所处位置的岩层垮落完成,顶板位移值达到最大,压应力趋于稳定。

在开采结束后,模型 1、2、3、4 煤层顶板竖向位移分别为 3.66 m、1.74 m、2.36 m、1.32 m。在开采 4 阶段完成后,与初始阶段相比,模型 1、

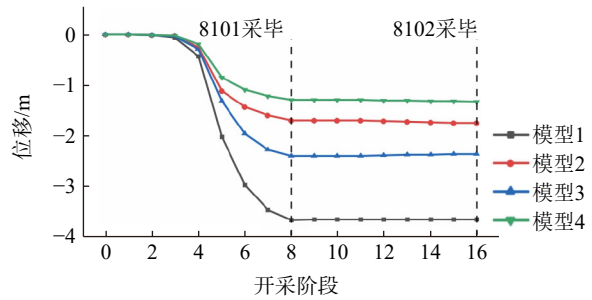


图 11 随工作面推进监测点位移曲线图

Fig. 11 Displacement of the monitoring points as the working face advances

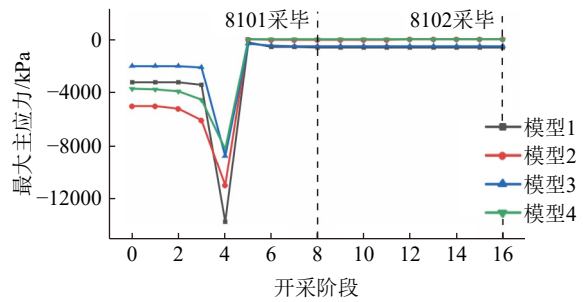


图 12 随工作面推进监测点最大主应力变化曲线

Fig. 12 Maximum principal stress variations at different monitoring points as the working face advances

2、3、4 煤层顶板压应力分别变化了 10 419 kPa、5 958 kPa、6 753 kPa、4 474 kPa。模型 1 和模型 3 的顶板竖向位移差为 1.30 m、顶板压应力变化值相差 3 666 kPa。模型 2 和模型 4 的顶板竖向位移差为 0.42 m、顶板压应力变化值相差 1 484 kPa。由此可分析得出:(1)在 2 种地形条件下,开采 8[#]煤引起的煤层顶板竖向位移差和压应力变化值的差均大于开采 11[#]煤;(2)无论是山区还是平原地区,开采 8[#]煤引起的煤层顶板竖向位移和压应力变化均大于开采 11[#]煤。

3.5 地表坡体破坏特征

由最大切应力理论可知,当斜坡内部某个面的剪应力达到了抗剪强度,坡体的稳定状态将遭到破坏,斜坡会沿剪切面发生失稳破坏,最终诱发滑坡、崩塌等地质灾害。以模型 3 为例,选取 Y=300 m 典型剖面,分析随工作面推进过程中模型的最大剪应变分布云图(图 13)。

结合图 5 可知,当 8101 工作面推进 200 m 时,采空区四周岩土体向采空区中心处移动,地表最大下沉值位于采空区中部,导致左侧坡体中部出现最大剪应变集中区,坡体上部土体在拉应力作用下有向坡脚移动的趋势,在斜坡后缘形成与坡

向相同的拉张裂隙; 当 8101 工作面开采结束后, 左侧坡体中部剪应变增大, 左侧坡顶拉张裂隙增大, 斜坡中上部可能从斜坡后缘沿剪切面向下滑动, 坡脚处受到挤压, 同时坡脚土体在采空区作用下向斜坡内部移动, 在双向挤压的作用下发生剪切变形, 其破坏模式为推移式滑坡; 当 8102 工作面推进 200 m 时, 采空区四周岩土体同样向采空区中心处移动, 两侧沉降漏斗相互影响, 坡脚向右移动导致坡脚及左侧坡体中部剪应变增大, 从而增加了左侧斜坡失稳的可能性, 同时右侧坡体中部剪应变增量显著, 坡顶处剪应变增量较小, 未与坡体中部贯通, 只在斜坡中部形成与坡向相同的拉张裂隙; 当 8102 工作面开采结束后, 两侧斜坡中部剪应变增大, 在两侧斜坡都出现贯通良好的剪切带, 斜坡容易沿剪切面发生滑动破坏。

因此, 可以通过分析剪应变增量来判断坡体的破坏特征, 当剪应变增量较小则坡体相对稳定, 反之则容易发生失稳破坏。煤层开采前最大剪应变为 0, 煤层开采后在两侧坡体中部都出现最大剪应变集中区, 8[#]煤层开采结束后地表最大剪应变为 0.017; 11[#]煤层开采结束后地表最大剪应变为 0.004(图 14), 说明当煤层埋深越浅, 开采后地表最大剪应变增量越大, 易发生滑坡、崩塌等地质灾害。

4 讨论

前人通过实地监测、数学统计、数值模拟等方法对沟谷地形条件下的开采沉陷规律进行了大量的研究, 主要集中在 3 个方面: 地表沉陷规律(关军琪等, 2022; 王双明等, 2022)、坡体破坏

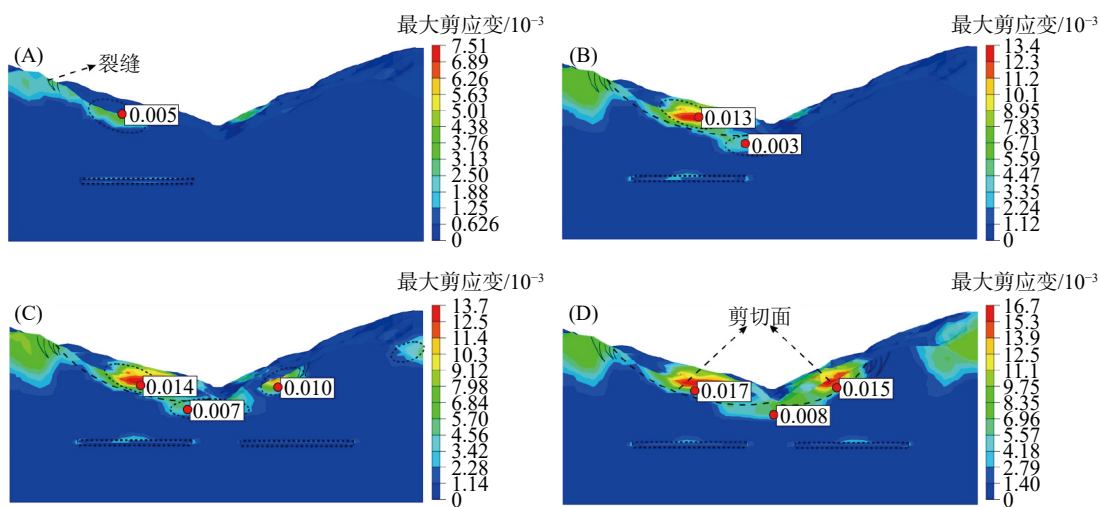


图 13 工作面推进过程中剪应变分布云图

Fig. 13 Cloud maps of shear strain during the advancement of the working face

(A)8101 工作面推进 200 m; (B)8101 工作面推进 400 m; (C)8102 工作面推进 200 m; (D)8102 工作面推进 400 m

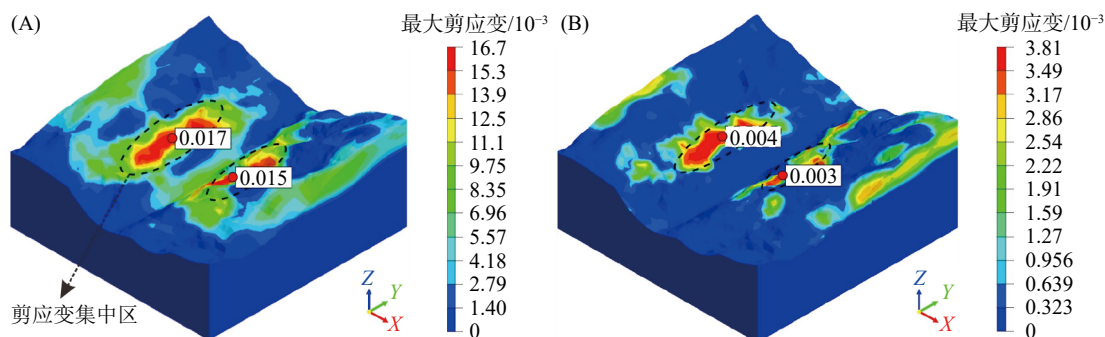


图 14 各模型剪应变分布云图

Fig. 14 Cloud maps of shear strain for each model

(A)模型 3; (B)模型 4

特征(王玉川等, 2013)以及覆岩应力应变特征(Wang et al., 2011; 唐礼忠等, 2012; 王宏志等, 2020)。然而目前的研究多聚焦于浅层煤或者多层煤的重复采动效应, 而对各单层煤开采沉陷的比较分析则相对不足。同时许多学者采用类似的研究方法对深部开采进行了探讨(何满潮等, 2005; 王永辉等, 2020), 结果表明深部开采会使预测地表移动和变形的参数发生改变, 如下沉系数减小(王永华等, 2020), 但相关研究大多集中在平原地区(李培现, 2012; 段进睿等, 2024), 未将地形地貌因素纳入综合分析中。因此本文针对地形地貌、工作面埋深这 2 个因素, 共建立 4 个模型, 对比分析在工作面埋深不同的情况下, 地形对开采沉陷的影响程度以及在 2 种地形条件下, 工作面埋深对开采沉陷的影响。研究结果表明:

(1)在 2 种地形条件下, 开采 8#煤引起的煤层顶板应力应变、中间煤柱顶板竖向位移及正上方地表竖向位移均存在差值, 这表明开采相同工作面时, 不同地形条件对地表变形的影响程度也不同; 且 2 种地形条件下开采 8#煤引起的煤层顶板应力应变、中间煤柱顶板竖向位移差值均大于开采 11#煤的。当煤层埋深足够深时, 无论是在山区还是平原地区, 开采同一层煤时, 中间煤柱上覆岩层的下沉趋势基本一致; 且开采 8#煤的中间煤柱上覆岩层下沉趋势整体大于 11#煤, 此外由于山区煤柱埋深较平原浅, 导致在 2 种地形条件下, 中间煤柱正上方地表处开采 8#煤引起的竖向位移差明显大于开采 11#煤引起的。即随着煤层埋深的增加, 地形对开采沉陷的影响减小。

(2)开采 8#煤引起的煤层顶板应力应变、中间煤柱顶板竖向位移均大于开采 11#煤引起的, 在平原地形条件下从煤柱到地表, 8#煤的中间煤柱上覆岩层下沉趋势整体大于 11#煤, 而在山区, 由于中间煤柱埋深较浅, 导致 8#煤的中间煤柱上覆岩层下沉趋势小于 11#煤。因此在平原地形条件下中间煤柱正上方地表处, 开采 8#煤引起的地表下沉量大于开采 11#煤引起的地表下沉量, 而山区沟谷地形条件下在中间煤柱正上方地表处, 开采 8#煤引起的地表下沉量小于开采 11#煤引起的地表下沉量。即随着煤层埋深的增加, 地下开采导致地表整体下沉幅度减小, 但在山区沟谷地形条件下, 中间煤柱正上方地表处由采煤引起的

竖向位移随煤层埋深增加反而增加。

这些特殊的移动变形规律主要受煤柱与地表之间的垂直距离以及关键层破碎程度的影响。开采 8#煤引起的中间煤柱上覆岩层下沉趋势整体大于 11#煤, 然而由于山区沟谷 8#煤的煤柱埋深较浅, 导致上覆岩层下沉趋势小于山区沟谷 11#煤的(图 10)。8#煤和 11#煤的上覆岩层下沉趋势不同, 主要是受到关键层破碎程度的影响。由于煤柱的应力应变会受到左右 2 个采空区的影响, 分析较为复杂, 因此选择采空区上覆岩层(图 4)作为研究对象。采空区上覆岩层的下沉会对煤柱挤压, 导致其下沉趋势与煤柱相反, 即 8#煤层开采后, 采空区上覆岩层下沉位移由下向上呈现出先增大后减小的趋势, 而 11#煤采空区上覆岩层下沉位移由下向上呈现出减小的趋势(图 15)。

关键层在承担上覆岩层的压应力后, 最大主应力重新分布形成“M 型应力拱”, 与“应力拱”相对应的地层被视为持力层即关键层。从最大主应力云图(图 16)可知, 持力层为粉砂质泥岩, 并且其强度较高(钱鸣高等, 1996), 因此可确定其为关键层。在煤层开采后, 上覆岩层向采空区移动, 但由于 MIDAS GTS NX 有限元软件的局限性, 无法直接观察到岩块间的移动, 只能通过主应力变化来分析关键层的位移情况。

开采结束后, 关键层破断形成“砌体梁”结构(许家林等, 2007), 8#煤层顶板的应力应变变化较大(图 11、图 12), 引起较大范围的岩层移动, 因此关键层破碎程度较高。岩体向下垮塌, 根据主应力云图可知(图 16-A), 8#煤层的关键层底部受到的拉应力为 247.28 kPa, 超过煤层顶板的拉应力 122.13 kPa, 导致关键层的位移较煤层

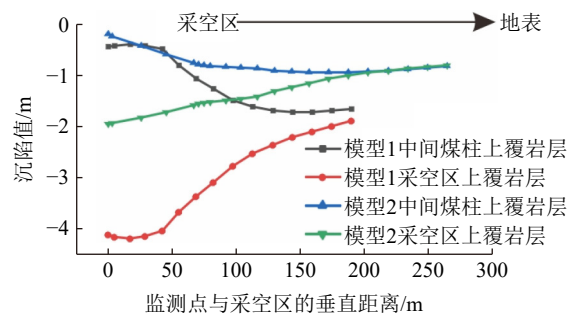


图 15 煤层上覆岩层竖向位移曲线

Fig. 15 Vertical displacement of the overburden rock layer above the coal seam

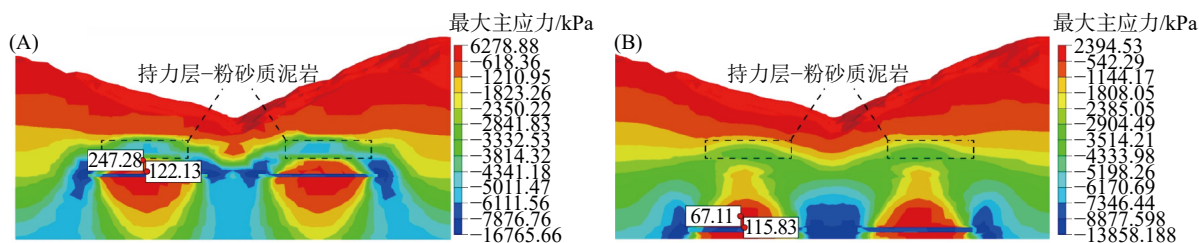


图 16 开采结束后最大主应力变化云图

Fig. 16 Cloud map of maximum principal stress after mining completion

(A)模型 3; (B)模型 4

顶板的位移大,使得从采空区至地表的覆岩移动变形先呈现出增大的趋势。然而关键层破碎后仍通过铰接结构对上覆岩层起到支撑作用,岩体破碎后充填采空区,碎石之间的空隙较大,可以充填采空区更大空间,从而减小上覆岩层的移动,导致上覆岩层的移动变形又呈现减小的趋势。对于 11[#]煤而言,粉砂质泥岩仍然为关键层,在开采结束后,11[#]煤煤层顶板应力应变变化较小(图 11、图 12),关键层破碎程度较低,未发生失稳大变形,岩层只是产生整体的下沉,从采空区至地表的覆岩移动变形呈现出减小的趋势(图 16-B)。

5 结论

(1)水平重复开采时采空区上方会形成沉降漏斗,相邻的沉降漏斗会相互影响;开采结束后,地表下沉量是由单工作面开采所引起的地表下沉量的叠加。

(2)在开采相同工作面时,不同地形条件对地表变形的影响程度也不同。随着煤层埋深的增加,地形对开采沉陷的影响减小;地下开采导致地表整体下沉的幅度减小,但在山区沟谷地形条件下,中间煤柱正上方地表处由采煤引起的竖向位移随煤层埋深增加反而增加。

(3)这些特殊的移动变形规律主要受煤柱与地表之间的垂直距离以及关键层破碎程度的影响,即山区沟谷 8[#]煤的煤柱埋深较浅以及 8[#]煤的关键层破碎程度较 11[#]煤的高。

(4)在山区沟谷地形条件下进行水平重复开采时,右侧工作面的开采会增加左侧斜坡失稳的可能性,斜坡容易沿剪切面发生滑动破坏。煤层埋深越深,地表最大剪应变增量越小,不易发生滑坡、崩塌等地质灾害。

附加材料:附表由作者提供,数据真实性由

作者负责,在线查看网址: <https://xbzrkx.cdlgzkx.2024062102>。

利益冲突声明: 本文所有作者声明本研究无任何利益冲突。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。

[参 考 文 献]

- 蔡云飞, 李晓静, 邓伟男, 等, 2020. 高强度开采地表移动变形规律及减损关键参数模拟[J]. 采矿与岩层控制工程学报, 2(4): 043511.
- Cai Y F, Li X J, Deng W N, et al., 2020. Simulation of surface movement and deformation rules and detriment key parameters in high-strength mining[J]. Journal of Mining and Strata Control Engineering, 2(4): 043511. (in Chinese)
- 陈勇, 2010. 开滦矿区深部开采地表移动规律的研究[D]. 焦作: 河南理工大学.
- Chen Y, 2010. Research on ground movement laws of deep mining in Kailuan mining area[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University. (in Chinese)
- 邓喀中, 张冬至, 张周权, 2000. 深部开采条件下地表沉陷预测及控制探讨[J]. 中国矿业大学学报, 29(1): 52—55.
- Deng K Z, Zhang D Z, Zhang Z Q, 2000. Study on prediction and control of surface subsidence in deep mining[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 29(1): 52—55. (in Chinese)
- 邓伟男, 2022. 寿阳地区不同采深条件下地表沉陷特征研究[J]. 煤炭技术, 41(5): 4—7.
- Deng W N, 2022. Research on mining subsidence characteristics under different mining depths in Shouyang area[J]. Coal Technology, 41(5): 4—7. (in Chinese)
- 董灿灿, 吕义清, 刘志辉, 等, 2020. 复杂地貌下行式开采地表移动变形规律[J]. 煤矿安全, 51(11): 237—242.
- Dong C C, Lü Y Q, Liu Z H, et al., 2020. Surface movement and deformation law in downward mining of complex geomorphology[J]. Safety in Coal Mines, 51(11): 237—242. (in Chinese)
- 段进睿, 吕义清, 葛若鑫, 2024. 重复开采条件下不同工作面布

- 置方式对开采沉陷的影响[J]. 矿业研究与开发, 44(1): 60—66.
- Duan J R, Lü Y Q, Ge R X, 2024. The impact of different panel layout methods on mining subsidence under repeated mining conditions[J]. Mining Research and Development, 44(1): 60—66. (in Chinese)
- 高均海, 白国良, 2016. 大强矿深部开采地表沉陷规律及机理研究[J]. 煤矿开采, 21(2): 26—28.
- Gao J H, Bai G L, 2016. Rule and mechanism of surface subsidence with deep mining in Daqiang coal mine[J]. Coal Mining Technology, 21(2): 26—28. (in Chinese)
- 关军琪, 吕义清, 赵国贞, 2022. 黄土沟谷区采空区充填对地表变形规律的影响研究[J]. 煤矿安全, 53(1): 49—55.
- Guan J Q, Lü Y Q, Zhao G Z, 2022. Study on the influence of goaf filling on surface deformation in loess gully area[J]. Safety in Coal Mines, 53(1): 49—55. (in Chinese)
- 国家统计局, 2024. 中华人民共和国 2023 年国民经济和社会发展统计公报[R/OL]. (2024-02-29)[2024-06-10]. https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202402/t20240228_1947915.html.
- 何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 等, 2005. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 24(16): 2803—2813.
- He M C, Xie H P, Peng S P, et al., 2005. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 24(16): 2803—2813. (in Chinese)
- 何万龙, 1983. 开采引起的山区地表移动与变形预计[J]. 煤炭科学技术, 11(6): 46—52.
- He W L, 1983. Prediction of surface movement and deformation caused by extraction in mountainous region[J]. Coal Science and Technology, 11(6): 46—52. (in Chinese)
- 侯恩科, 陈育, 车晓阳, 等, 2021. 浅埋煤层过沟开采覆岩破坏特征及裂隙演化规律研究[J]. 煤炭科学技术, 49(10): 185—192.
- Hou E K, Chen Y, Che X Y, et al., 2021. Study on overburden failure characteristics and fracture evolution law of shallow buried coal seam through trench mining[J]. Coal Science and Technology, 49(10): 185—192. (in Chinese)
- 胡琪, 2014. 不同地形条件下地下开采引地表移动与变形的对比分析[D]. 太原: 太原理工大学.
- Hu Q, 2014. The research of surface movement and deformation caused by underground mining in different terrain conditions[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology. (in Chinese)
- 李培现, 2012. 深部开采地表沉陷规律及预测方法研究——以徐州矿区为例[D]. 徐州: 中国矿业大学.
- Li P X, 2012. Study on regularity and prediction method of surface subsidence due to deep mining-taking Xuzhou coal mining area as example[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology. (in Chinese)
- 刘瑾, 孙占法, 张永波, 2007. 采深和松散层厚度对开采沉陷地表移动变形影响的数值模拟研究[J]. 水文地质工程地质, 34(4): 88—93.
- Liu J, Sun Z F, Zhang Y B, 2007. Numerical simulation of the effect of thickness mining and loose Seam's thickness on ground movement and deformation in mining subsidence[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 34(4): 88—93. (in Chinese)
- 刘义新, 戴华阳, 姜耀东, 等, 2013. 厚松散层大采深下采煤地表移动规律研究[J]. 煤炭科学技术, 41(5): 117—120.
- Liu Y X, Dai H Y, Jiang Y D, et al., 2013. Study on surface movement law above underground deep mining under thick unconsolidated overburden strata[J]. Coal Science and Technology, 41(5): 117—120. (in Chinese)
- 刘志辉, 吕义清, 2020. 黄土沟谷区浅埋煤层开采斜坡变形破坏机理[J]. 煤炭工程, 52(10): 104—108.
- Liu Z H, Lü Y Q, 2020. Slope deformation and failure mechanism of shallow coal seam mining in loess gully area[J]. Coal Engineering, 52(10): 104—108. (in Chinese)
- 芦家欣, 汤伏全, 赵军仪, 等, 2019. 黄土矿区开采沉陷与地表损害研究述评[J]. 西安科技大学学报, 39(5): 859—866.
- Lu J X, Tang F Q, Zhao J Y, et al., 2019. Review of study on mining subsidence and ground surface damage in loess mining area[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 39(5): 859—866. (in Chinese)
- 彭林军, 赵晓东, 李术才, 2011. 深部开采地表沉陷规律模拟研究[J]. 岩土力学, 32(6): 1910—1914.
- Peng L J, Zhao X D, Li S C, 2011. Simulating research on rules of surface subsidence due to deep mining[J]. Rock and Soil Mechanics, 32(6): 1910—1914. (in Chinese)
- 钱鸣高, 缪协兴, 许家林, 1996. 岩层控制中的关键层理论研究[J]. 煤炭学报, 21(3): 225—230.
- Qian M G, Miao X X, Xu J L, 1996. Theoretical study of key stratum in ground control[J]. Journal of China Coal Society, 21(3): 225—230. (in Chinese)
- 汤伏全, 1989. 采动滑坡的机理分析[J]. 西安矿业学院学报, 9(3): 32—36.
- Tang F Q, 1989. Mechanism analysis of landslide by mining[J]. Journal of Xi'an University of Science & Technology, 9(3): 32—36. (in Chinese)
- 唐礼忠, 周建雄, 张君, 等, 2012. 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), 39(6): 623—628.
- Tang L Z, Zhou J X, Zhang J, et al., 2012. Mechanical response of deep stoped-out areas and filling effect under dynamic disturbance[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 39(6): 623—628. (in Chinese)

- Chinese)
- 王宏志,刘洪林,宋帅帅,等,2020.沟谷地形下近浅埋煤层工作面矿压显现规律研究[J].中国矿业,29(9):116—120.
- Wang H Z, Liu H L, Song S S, et al., 2020. Study on ground pressure behaviors of working face in nearly shallow coal seam under gully terrain[J]. China Mining Magazine, 29(9): 116—120. (in Chinese)
- 王启春,柏雯娟,郭广礼,2017.基岩裸露山区倾斜煤层开采地表沉陷规律研究[J].矿业安全与环保,44(5):76—80.
- Wang Q C, Bai W J, Guo G L, 2017. Study on surface subsidence law of inclined seam mining in mountain area with base rock exposure[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 44(5): 76—80. (in Chinese)
- 王双明,魏江波,宋世杰,等,2022.黄土沟谷区浅埋煤层开采覆岩破坏与地表损伤特征研究[J].煤炭科学技术,50(5):1—9.
- Wang S M, Wei J B, Song S J, et al., 2022. Study on overburden and surface damage characteristics of shallow-buried coal seam mining in loess gully area[J]. Coal Science and Technology, 50(5): 1—9. (in Chinese)
- 王玉川,巨能攀,赵建军,等,2013.缓倾煤层采空区上覆山体滑坡形成机制分析[J].工程地质学报,21(1):61—68.
- Wang Y C, Ju N P, Zhao J J, et al., 2013. Formation mechanism of landslide above the mined out area in gently inclined coal beds[J]. Journal of Engineering Geology, 21(1): 61—68. (in Chinese)
- 王永辉,冯园,李兰兰,2020.巨厚松散层下开采沉陷岩土体移动变形规律[J].成都理工大学学报(自然科学版),47(6):733—741.
- Wang Y H, Feng Y, Li L L, 2020. Regularity of movement and deformation of rock and soil mass in mining subsidence under giant thick loose layer[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 47(6): 733—741. (in Chinese)
- 王永华,张旺,张代军,等,2020.东部矿区开采深度对地表移动参数的影响规律研究[J].中国矿业,29(8):133—137.
- Wang Y H, Zhang W, Zhang D J, et al., 2020. Influences of surface movement parameters due to mining depth in eastern mining area[J]. China Mining Magazine, 29(8): 133—137. (in Chinese)
- 许家林,连国明,朱卫兵,等,2007.深部开采覆岩关键层对地表沉陷的影响[J].煤炭学报,32(7):686—690.
- Xu J L, Lian G M, Zhu W B, et al., 2007. Influence of the key strata in deep mining to mining subsidence[J]. Journal of China Coal Society, 32(7): 686—690. (in Chinese)
- 许家林,朱卫兵,王晓振,2012.沟谷地形对浅埋煤层开采矿压显现的影响机理[J].煤炭学报,37(2):179—185.
- Xu J L, Zhu W B, Wang X Z, 2012. Influencing mechanism of gully terrain on ground pressure behaviors in shallow seam longwall mining[J]. Journal of China Coal Society, 37(2): 179—185. (in Chinese)
- 杨秀宇,巨文涛,张光磊,等,2020.黄土沟壑地貌下原岩应力场分布特征研究[J].中国矿业,29(9):121—126.
- Yang X Y, Ju W T, Zhang G L, et al., 2020. Study on the distribution characteristics of the in-situ rock stress field under the loess gully landform[J]. China Mining Magazine, 29(9): 121—126. (in Chinese)
- 伊永杰,王捞捞,朱卫兵,2023.保德煤矿冲沟地形下综放开采地表沉陷规律研究[J].中国矿业,32(3):60—66.
- Yi Y J, Wang L L, Zhu W B, 2023. Research on surface subsidence characteristics caused by comprehensive mining of gully terrain in Baode Coal Mine[J]. China Mining Magazine, 32(3): 60—66. (in Chinese)
- 于保华,朱卫兵,许家林,2007.深部开采地表沉陷特征的数值模拟[J].采矿与安全工程学报,24(4):422—426.
- Yu B H, Zhu W B, Xu J L, 2007. Numerical simulation of surface subsidence induced by deep mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 24(4): 422—426. (in Chinese)
- 于广明,董春胜,邹建喜,等,2004.资源枯竭矿区深井开采引起地层再破坏的复杂性研究[J].岩石力学与工程学报,23(14):2341—2345.
- Yu G M, Dong C S, Zou J X, et al., 2004. Complexity study of redestroyed strata caused by deep mining in resource depletion area[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 23(14): 2341—2345. (in Chinese)
- Altun A O, Yilmaz I, Yildirim M, 2010. A short review on the surficial impacts of underground mining[J]. Scientific Research and Essays, 5(21): 3206—3212.
- Li J W, Liu C Y, Wang W C, et al., 2019. Linkage-induced mechanism and control technology of pressure bump and surface geological damage in shallow coal seam mining of gully area[J]. Arabian Journal of Geosciences, 12(11): 349.
- Li J W, Liu C Y, Zhao T, 2016. Effects of gully terrain on stress field distribution and ground pressure behavior in shallow seam mining[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 26(2): 255—260.
- Tang F Q, 2009. Research on mechanism of mountain landslide due to underground mining[J]. Journal of Coal Science and Engineering (China), 15(4): 351—354.
- Wang X F, Zhang D S, Fan G W, et al., 2011. Underground pressure characteristics analysis in back-gully mining of shallow coal seam under a bedrock gully slope[J]. Mining Science and Technology, 21(1): 23—27.
- Zhang Z Q, Xu J L, Zhu W B, et al., 2012. Simulation research on the influence of eroded primary key strata on dynamic strata pressure of shallow coal seams in gully terrain[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 22(1): 51—55.