缓倾斜煤层采动底板破坏空间特征研究及应用

黄辉[1]，宋喜东[1]，虎晓龙[1]，高峻[1]，黄忠正[1]，曹永刚[1]，马金林[1]，王傲[2]

（1.国家能源集团宁夏灵信煤业有限责任公司灵新煤矿，宁夏 灵武 751410；2.山东大学，山东 济南 250100）

摘要：厘清采动缓倾斜底板破坏空间特征是保证承压水上安全开采的关键问题。当前研究集中于采动底板破坏深度，其空间破坏特征易被忽视。为此，以灵新煤矿 061405 工作面为工程背景，基于弹性力学理论和数值模拟研究采动缓倾斜底板应力分布及空间破坏特征，并提出考虑底板破坏空间特征的突水危险性评价方法。结果表明：采动缓倾斜底板最大破坏深度解析值为 21.5m；沿工作面倾向采动底板破坏形态呈现“非对称倒马鞍”形且具有“靠近采空区上侧破坏深度小、下侧破坏深度大”的特征；采动缓倾斜底板整体破坏空间特征整体呈现从采空区中心区域向四周断层式增长的不对称性趋势；考虑底板破坏空间特征的突水危险性评价结果与开采实践情况一致。

关键词：缓倾斜煤层；采动底板；空间破坏特征；理论解析；数值模拟

中图分类号：TD713^{+}.1　　**文献标志码：**A

Research on Spatial Failure Characteristics of Mining Floor in Gently Inclined Coal Seams of Underground Coal Mining and Its Application

Hui Huang[1]、Xidong Song[1]、Xiaolong Hu[1]、Jun Gao[1]、Zhongzheng Huang[1]、Yonggang Cao[1]、Jinlin Ma[1]、Ao Wang[2]

(1. Ningxia Lingxin Coal Industry Co., Ltd, Ningxia Lingwu 751410；2.Shandong University, Shandong Jinan 250100)

Abstract: Clarifying the spatial failure characteristics of mining gently inclined floor is a key problem for safe mining above confined aquifer. The current research focuses on the failure depth of mining floor, whose failure spatial characteristics are easy to be ignored. Therefore, with the 061405 coalface of Lingxin Coal Mine as the engineering background, the stress distribution and failure characteristics of mining gently inclined floor was investigated using the elastic mechanics theory and numerical simulation, and then a risk assessment method with spatial failure characteristics for floor water inrush was proposed. The research results show that: the maximum failure depth of the mining inclined floor is 21.5 m. And the failure pattern along the inclination direction of coalface presents a "inverted saddle" shape, which has the characteristics of "small failure depth near the upper side of the goaf, and large failure depth at the lower side". The overall space depth characteristics of mining gently inclined floor show an asymmetric trend with fault-like growth from the central area to the goaf surrounding of the coalface. The risk assessment result of water inrush based on the comprehensive consideration of the spatial characteristics of floor failure are consistent with the mining practice.

Keywords: gently inclined coal seam; mining floor; spatial failure characteristics; theoretical analysis; numerical simulation

收稿日期：2023-06-01；2023-07-13 修订

作者简介：黄辉（1984—），男，汉族，宁夏中宁人，硕士，高级工程师，主要从事煤矿生产与管理等方面的工作，E-mail:hui.huang@ceic.com。

受底板承压水威胁的煤炭储量占全国总储量的 50%以上，且缓倾斜煤层占煤炭储量比例较大[1]，严重影响缓倾斜煤炭资源安全开采。探明采动缓倾斜底板空间破坏特征是保证井工煤矿承压水上安全开采的关键科学问题。

目前，针对近水平煤层承压水上采动底板破坏特征开展了大量研究。张金才等[2]、王连国等[3]、鲁海峰等[4]、杨仁树[5]、刘伟韬[6]、张婷[7]等分别从塑性滑移线、半无限体、横观各向同性等理论角度解析了采动底板应力分布规律及破坏特征。陈军涛等[8]、宋文成[9]、施龙青[10]、张玉军等[11]、刘永生[12]、杨海平等[13]、王琳等[14]、施龙青等[15]、孙志强[16]、徐瑞朋等[17]、刘士亮等[18]、张风达等[19]、唐鑫等[20]、陈洋等[21]分别从相似材料模拟、数学理论、数值模拟、物理勘探等角度探究了多因素下底板破坏深度经验公式。上述研究成果对于承压水上煤层安全开采提供了重要的理论和实践支撑，但仍存在以下不足：（1）采动底板破坏特征往往集中于走向或倾向某一个剖面，侧重于某一剖面的采动底板破坏深度，缺乏其空间破坏形态研究；（2）已有研究未考虑矿山压力、承压水水压和煤层倾角对底板破坏空间形态的综合影响以及空间破坏特征条件下的底板突水危险性评价方法。

为此，综合考虑煤层倾角、矿山压力、承压水压力等影响因素，分别从工作面走向和倾向角度解析承压水上缓倾斜煤层采动底板空间破坏形态；同时，结合数值模拟探究工作面推进过程中采动底板三维破坏特征。基于此，提出考虑底板破坏空间特征的突水危险性评价方法。

1 工程背景

灵新煤矿 061405 工作面采煤方法为一次采全厚长壁采煤法，其走向、倾向长度分别为 2631m、288m。14 煤平均埋深 350m、倾角 12°、煤厚 1.95m。工作面底板到宝塔山砂岩含水层顶界面的平均距离为 47.66m。根据 706 号水文孔，底板宝塔山砂岩水头压力 0.68MPa。061405 工作面煤层顶底板岩层综合柱状图如图 1 所示。

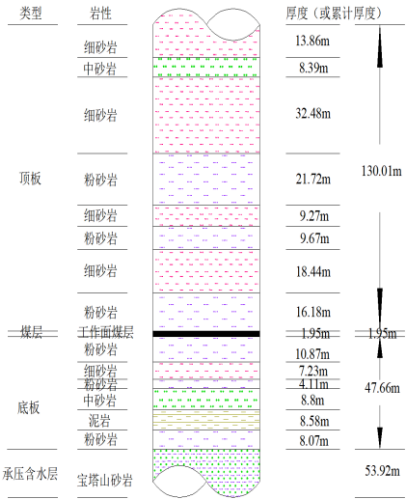


图 1　工作面煤层顶底板岩层综合柱状图

Fig.1 Comprehensive histogram of overburden and floor strata in 061405 coalface

2 采动缓倾斜底板应力分布及破坏空间特征解析

2.1 采动缓倾斜底板应力分布规律

2.1.1 沿工作面走向采动底板应力分布

假设原岩应力是否保留？为 γH，煤壁前方支承压力峰值大小为 $k_1\gamma H$。工作面回采过程中，沿工作面走向煤壁前方应力增高区看作三角形线性载荷 $F_2(y)$和梯形线性荷载 $F_1(y)$，后方采空区应力恢复区看作三角形线性载荷 $F_3(y)$，承压水看作均布载荷 $F_4(y)$。基于此，沿工作面走向采动底板应力分布力学模型如图 2 所示。

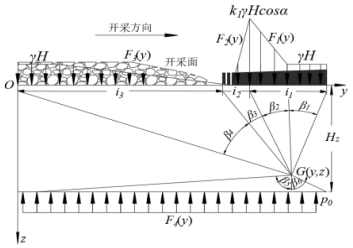


图 2　沿工作面走向采动底板力学模型

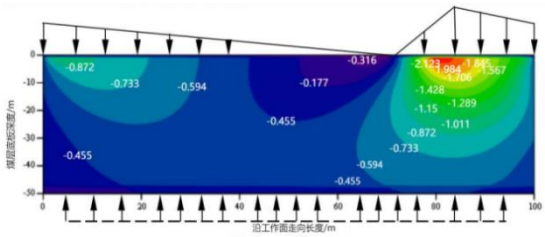
Fig.2 Mechanical model of mining floor along the coalface strike

在四个载荷作用下，基于弹性力学半无限体理论[22]推导沿工作面走向采动底板内某一点 $G(y,z)$的应力分量[6]，见式（1）所示。

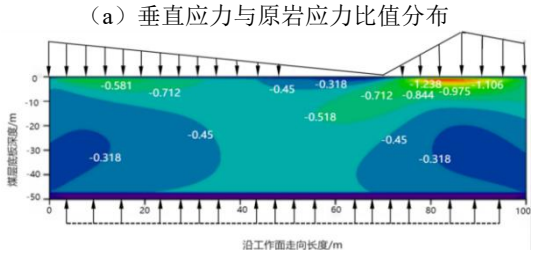
$$\begin{cases}\sigma_z=\sigma_{z1}+\sigma_{z2}+\sigma_{z3}+\sigma_{z4}\\ \sigma_y=\sigma_{y1}+\sigma_{y2}+\sigma_{y3}+\sigma_{y4}\\ \tau_{zy}=\tau_{zy1}+\tau_{zy2}+\tau_{zy3}+\tau_{zy4}\end{cases}\qquad(1)$$

式中，σ_z，σ_y 和 τ_{zy} 分别为作用于底板岩体任一点的垂直应力、水平应力和剪切应力。

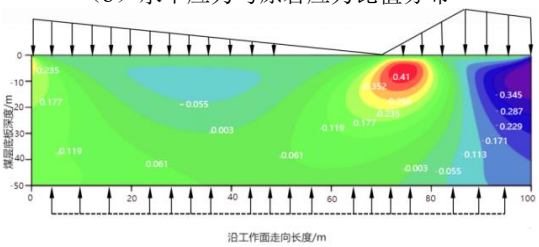
根据灵新煤矿 061405 工作面工程背景，参数取值如下：煤层埋深 H=350m，煤层厚度 M=1.95m，工作面斜长 L=288m，底板岩体平均重度 γ=25kN/m^3，底板距承压水顶界面的距离 H_z=47.66m，承压水压力 P_0=0.68 MPa，水密度 ρ_w=1000kg/m^3，g=10N/kg，煤壁前方应力集中系数 k_1=2.2，i_1=20 m，i_2=10 m，i_3=70 m。结合公式（1），基于 MathCAD 软件沿工作面走向采动底板垂直、水平和剪切应力分布如图 3 所示。



（a）垂直应力与原岩应力比值分布



（b）水平应力与原岩应力比值分布



（c）剪切应力与原岩应力比值分布

图 3　沿工作面走向采动底板应力分布

Fig.3 Stress distribution of mining floor along the coalface strike

沿工作面走向采动底板垂直应力和水平应力随底板深度增加逐渐衰减，如图3a和图 3b 所示。垂直应力等值线的形态类似于“贝壳线”，传播方向垂直于煤层底板向下。垂直应力增高区位于工作面煤壁前方 10~15m 处。在工作面煤壁前方 6~12m 处出现一个应力值较高的剪应力区（图 3c），工作面煤壁后方处于卸压区，这种不均衡受力诱发底板岩体产生剪切破坏。

2.1.2 沿工作面倾向采动底板应力分布

假设沿工作面倾向采动缓倾斜煤层底板采空区上、下侧煤体所受支承压力峰值是否保留？分别为 $k_3\gamma H$ 和 $k_2\gamma H$。工作面回采过程中，采空区上、下侧煤体应力增高区均看作三角形线性载荷 $F_2(x)$、$F_4(x)$和梯形线性荷载 $F_1(x)$、$F_5(x)$，采空区恢复应力看作均布荷载 $F_3(x)$，承压水压力看作线性荷载 $F_6(x)$。基于此，沿工作面倾向采动缓倾斜底板应力分布解析模型如图 4 所示。

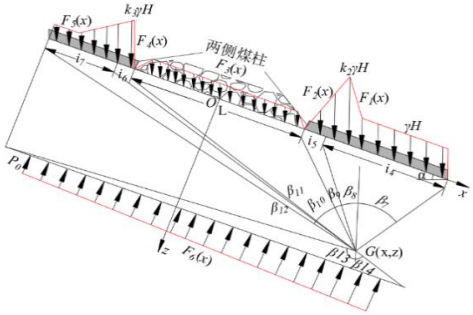


图 4　沿工作面倾向采动缓倾斜底板力学模型

Fig.4 Mechanical model of gently inclined floor along coalface inclination

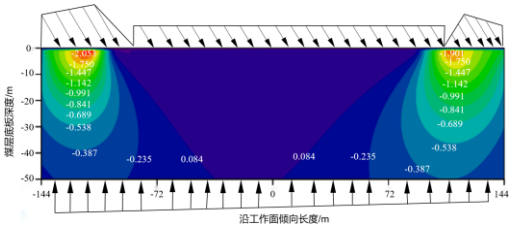
考虑到荷载与煤层底板呈现夹角，各载荷分解为垂直于底板边界的法向载荷和平行于底板边界的切向载荷。据此，基于弹性力学半无限体理论[17]推导沿工作面倾向采动缓倾斜底板内某一点 $G(x, z)$的应力分量[9]，见式（2）和式（3）所示。

$$\begin{cases}\sigma_z^{(N)}=\sigma_{z1}^{(N)}+\sigma_{z2}^{(N)}+\sigma_{z3}^{(N)}+\sigma_{z4}^{(N)}+\sigma_{z5}^{(N)}+\sigma_{z6}^{(N)}\\ \sigma_x^{(N)}=\sigma_{x1}^{(N)}+\sigma_{x2}^{(N)}+\sigma_{x3}^{(N)}+\sigma_{x4}^{(N)}+\sigma_{x5}^{(N)}+\sigma_{x6}^{(N)}\\ \tau_{zx}^{(N)}=\tau_{zx1}^{(N)}+\tau_{zx2}^{(N)}+\tau_{zx3}^{(N)}+\tau_{zx4}^{(N)}+\tau_{zx5}^{(N)}+\tau_{zx6}^{(N)}\end{cases}\qquad(2)$$

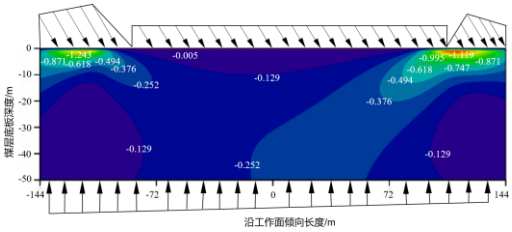
$$\begin{cases}\sigma_z^{(T)}=\sigma_{z1}^{(T)}+\sigma_{z2}^{(T)}+\sigma_{z3}^{(T)}+\sigma_{z4}^{(T)}+\sigma_{z5}^{(T)}+\sigma_{z6}^{(T)}\\ \sigma_x^{(T)}=\sigma_{x1}^{(T)}+\sigma_{x2}^{(T)}+\sigma_{x3}^{(T)}+\sigma_{x4}^{(T)}+\sigma_{x5}^{(T)}+\sigma_{x6}^{(T)}\\ \tau_{zx}^{(T)}=\tau_{zx1}^{(T)}+\tau_{zx2}^{(T)}+\tau_{zx3}^{(T)}+\tau_{zx4}^{(T)}+\tau_{zx5}^{(T)}+\tau_{zx6}^{(T)}\end{cases}\qquad(3)$$

根据灵新煤矿 061405 工作面工程背景，参数取值如下：下巷应力集中系数 k_2=2.3，上巷应力集中系数 k_3=2.0，i_4=22m，i_5=11m，i_6=8m，i_7=17m，煤层倾角 α=12°。据《矿区

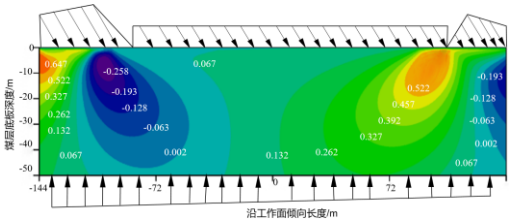
水文地质工程地质勘查规范》[21]计算垮落带高度 H_m=9.2m。结合公式（2）（3），基于 MathCAD 软件沿工作面倾向采动底板垂直、水平和剪切应力分布如图 5 所示。



（a）垂直应力与原岩应力比值分布



（b）水平应力与原岩应力比值分布



（c）剪切应力与原岩应力比值分布

图 5　沿工作面倾向采动缓倾斜底板应力分布
Fig.5 Stress distribution of mining gently inclined floor along the coalface inclination

沿工作面倾向采动缓倾斜底板分别存在 2 个垂直应力增高区、2 个水平应力增高区和 2 个剪切应力增高区，采动底板下端部的应力集中程度和作用范围明显大于上端部，如图 5 所示。底板应力增高区呈现非对称性分布特征，等值线形态均明显向采空区一侧偏移。

2.2 采动缓倾斜底板破坏空间特征解析

由于底板岩体的应力向深部传播，底板岩体破坏是由底板的抗剪强度决定的。基于此，结合 Mohr-Coulomb 准则，采动缓倾斜底板内某点的最大剪切应力为[24]：

$$\tau_{\max}=\sqrt{\left(\frac{\sigma_y-\sigma_z}{2}\right)^2+\tau_{zy}^2} \qquad (4)$$

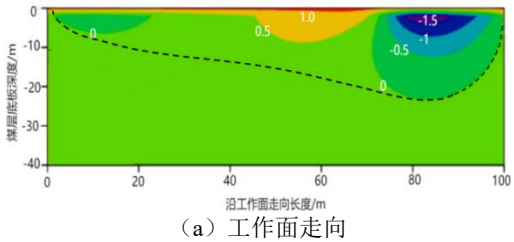
底板任意点的破坏判据为：

$$\left(\frac{\sigma_y+\sigma_z}{2}\tan\varphi+c\right)/\sqrt{\tan^2\varphi+1}\geq\tau_{\max} \qquad (5)$$

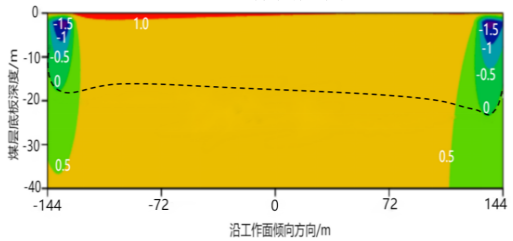
据此，构造采动缓倾斜底板破坏特征判别函数 $f(z,y)$：

$$f(z,y)=\left(\frac{\sigma_y+\sigma_z}{2}\tan\varphi+c\right)/\sqrt{\tan^2\varphi+1}-\tau_{\max} \qquad (6)$$

如果 $f(z,y)>0$，则底板岩体遭到破坏。据此，基于 *MathCAD* 软件的沿工作面走向、倾向采动缓倾斜底板破坏特征如图 6 所示。



（a）工作面走向



（b）工作面倾向

图 6　采动缓倾斜底板破坏空间特征解析图
Fig.6. Spatial failure characteristics of the mining gently inclined floor

沿工作面走向采动缓倾斜底板破坏形态呈现“勺”形（图 6a），底板破坏深度最大值为 21.20m，位于工作面煤壁前方 10.30m 处，该最大破坏深度位置与剪切应力增高区位置基本一致；而采空区后方底板岩体破坏深度较小，其值为 6.53m。沿工作面倾向采动倾斜底板破坏形态呈现“倒马鞍”形且具有“靠近采空区上侧破坏深度小、下侧破坏深度大”的特征（图 6b），其中，采动底板破坏深度最大值为 21.50m。

综上，对于煤层开采过程中某一时段的采动缓倾斜底板空间破坏特征整体呈现：工作面采空区区域整体凹陷，且越靠近工作面煤壁处凹陷程度越大。相较于整体凹陷区域，靠近工作面煤壁、工作面上巷和下巷处凹陷程度更大。其破坏深度呈现从采空区中心区域向四周递增的不对称性趋势。

3 采动缓倾斜底板破坏特征数值模拟

3.1 数值模型构建

根据 061405 工作面地质和煤层开采条件，结合综合柱状图（图 1）和实测的各岩

层物理力学参数（表 1），基于 FlAC^{3D} 建立采动缓倾斜底板破坏空间特征数值模型，长、宽、高分别为 400m、400m、300m，如图 7 所示。模型四周均施加固定约束，模型顶部施加均布荷载 5.5MPa，模型底部承压含水层水压为 0.86MPa。工作面采用走向长壁分步开采，沿工作面走向模型两侧边界各留 100m 保护煤柱，沿工作面倾向模型两侧边界各留 56m。煤层开挖采用分步开挖，每步沿煤层走向开挖 10m，共开挖 20 步。

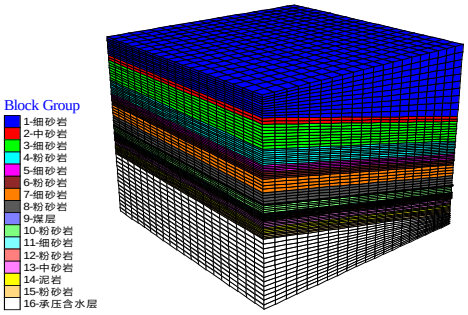


图 7　FLAC^{3D} 数值模型

Fig.7. FLAC^{3D} numerical model

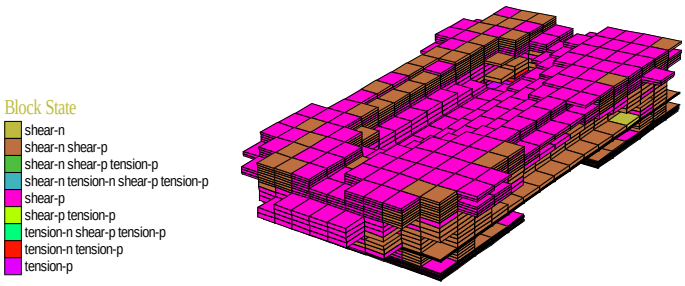
表 1　061405 工作面顶底板岩层物理力学参数

Tab.1 Physical and mechanical parameters of the top and bottom strata of the 061405 coalface

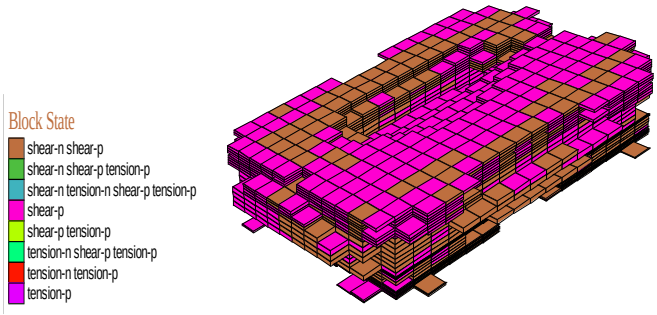
岩层类别	重度 /(kN·m^{-3})	切变模量 /MPa	体积模量 /MPa	黏聚力 /MPa	内摩擦角 /(°)	抗拉强度 /MPa	孔隙率
细砂岩	25	3600	4200	4.5	33	3.7	0.3
中砂岩	27	2800	4500	5.2	32	3.6	0.4
细砂岩	25	3600	4200	4.5	33	3.7	0.3
粉砂岩	26	4300	4100	5.8	32	4.2	0.3
细砂岩	25	3600	4200	4.5	33	3.7	0.3
粉砂岩	26	4300	4100	5.8	32	4.2	0.3
细砂岩	25	3600	4200	4.5	33	3.7	0.3
粉砂岩	26	4300	4100	5.8	32	4.2	0.3
14 煤	14	600	1300	2.3	20	1.6	0.5
粉砂岩	26	4300	4100	5.8	32	4.2	0.3
细砂岩	25	3600	4200	4.5	33	3.7	0.3
粉砂岩	26	4300	4100	5.8	32	4.2	0.3
中砂岩	27	2800	4500	5.2	32	3.6	0.4
泥岩	26	2000	3000	3.2	31	2.8	0.2
粉砂岩	26	4300	4100	5.8	32	4.2	0.3
宝塔山砂岩含水层	25	1600	2300	2.0	30	2.2	0.7

3.2 数值模拟结果

为获取数值模拟中采动缓倾斜底板三维破坏形态，编码了 fish 语言程序提取采动底板单元体塑性破坏区，可直观呈现三维破坏形态。数值模拟显示：开挖至第 15 步，即距开切眼 150m 处，位于采空区下侧巷道的底板破坏深度最大值 20.85m，位于采空区上侧巷道的底板破坏深度最大值 18.05m。随着开挖推进，其空间破坏深度保持恒定。为此，考虑篇幅限制，基于 *fish* 语言程序呈现开挖第 15 步、第 20 步的底板三维破坏形态，如图 8 所示。



（a）开挖第 15 步



（b）开挖第 20 步

图 8　不同开挖步采动缓倾斜底板空间破坏形态

Fig.8 Spatial failure pattern of gently inclined floor at different excavation steps

数值模拟结果可知：采动底板岩体破坏深度最大值为 20.85m，其整体空间破坏形态为中间 1/4 左右的区域呈现“十字”形凹陷，其余区域呈现平滑的沿煤层倾向的平面型破坏，且在边角处呈现略微高于该平面型的破坏特征，即：其破坏深度呈现从采空区中心区域向四周断层式增长的不对称性趋势。

4 考虑采动底板空间破坏特征的突水危险性评价

基于上述采动底板破坏空间特征成果，分别计算工作面内 7 个钻孔位置的底板破坏深度；其次，获取 7 个钻孔位置的突水系数；最后，基于 *Surfer* 的采动缓倾斜底板突水系数等值线分布如图 9 所示。

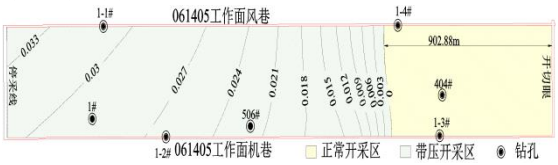


图 9　采动缓倾斜底板突水系数等值线分布图

Fig.9 Contour distribution map of water inrush coefficient from gently inclined mining floor

距开切眼 902.88m 范围内突水系数小于 0，为正常开采区；工作面其他部分突水系数大于 0 且小于 0.06MPa/m，为带压开采区但无突水危险性。此外，沿工作面倾向的风巷和机巷相对应位置，风巷处的突水系数明显小于机巷处，验证了底板空间破坏特征中上巷处最大破坏深度小于下巷处。061405 工作面实际开采过程中，没有发生底板突水事故，验证了考虑底板破坏空间特征的突水危险性评价方法的可行性。

5 结论

1）综合考虑矿山压力、承压水压力及煤层倾角等因素，建立了采动缓倾斜底板应力及破坏特征力学模型。理论解析表明：沿工作面倾向采动底板破坏形态呈现“倒马鞍”形且具有“靠近采空区上侧破坏深度小、下侧破坏深度大”的特征。

2）数值模拟表明：工作面采动底板破坏深度最大值为 20.85m，编码 fish 语言程序提取采动底板单元体塑性破坏区，可呈现采动底板空间破坏形态。

3）采动缓倾斜底板空间破坏特征理论解析和数值模拟结果基本一致。《动载作用下孔周煤-混凝土组合体动力学破坏特征》审稿意见：

1、文章篇幅过长，需进一步精简凝练

2、论文研究的指导意义不明确，围绕主题设计的实验不合理，未体现出研究煤-混凝土组合体力学对瓦斯抽采封孔的具体指导在哪些方面，文中研究背景只是泛泛而谈。

3、实验研究目的和结果不明确，研究结果多为表观现象和规律，未深入分析内在机理，整体研究深度不足。

4、研究内容、方法均为常规，整体创新性不足。

5、研究成果为常规规律性结论，无新的观点。

6、第二章中试样的应力、抗拉强度等数据需核实，与实际不符。

（4）考虑底板破坏空间特征的突水危

险性评价结果与开采实践情况一致，同时验证了该方法的有效性。

参考文献：

[1]周茂普，曹胜根，江小军.缓倾斜煤层连续采煤机短壁开采工艺研究与应用[J].采矿与安全工程学报，2014, 31(1)：55-59.

Zhou Maopu, Cao Shenggen, Jiang Xiaojun. Research on the application of continuous miner shortwall mining technology in gently inclined longwall face[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2014, 31(1): 55-59.

[2]张金才，张玉卓，刘天泉.岩体渗流与煤层底板突水[M].北京:地质出版社，1997.

Zhang Jincai, Zhang Yuzhuo, Liu Tianquan. Rock mass seepage and water inrush from coal seam floor[M]. Beijing: The Geological Publishing House, 1997.

[3]王连国，韩猛，王占盛，等.采场底板应力分布与破坏规律研究[J].采矿与安全工程学报，2013, 30(3)：317-322.

Wang Lianguo, Han Meng, Wang Zhansheng, et al. Stress distribution and damage law of mining floor[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(3): 317-322.

[4]鲁海峰，姚多喜.采动底板层状岩体应力分布规律及破坏深度研究[J].岩石力学与工程学报，2014, 33(10)，2030-2039.

Lu Haifeng, Yao Duoxi. Stress distribution and failure depths of layered rock mass of mining floor[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(10)，2030-2039.

[5]杨仁树，朱晔，李永亮，等.层状岩体中巷道底板应力分布规律及损伤破坏特征[J].中国矿业大学学报，2020，49(4)：615-627.

Yang Renshu, Zhu Ye, Li Yongliang, et al. Stress distribution and damage characteristics of roadways floor in layered rock[J]. Journal of University of Mining & Technology, 2022, 49(4): 615-626.

[6]刘伟韬，穆殿瑞，谢祥祥，等. 倾斜煤层底板采动应力分布规律及破坏特征[J]. 采矿与安全工程学报，2018,35（4）：756-764.

Liu Weitao, Mu Dianrui, Xie Xiangxiang, et al. Rules of stress distributions and failure characteristics in inclined coal seam floor due to mining[J].Journal of Mining & Safety Engineering, 2018, 35(4): 756-764.

[7]张婷，田勇，于超，等.煤层底板突水脆弱性预测评价系统设计与实现[J]. 能源与环保，2020，42(4)：22-27.

Zhang Ting, Tian Yong, Yu Chao, et al. Design and implementation of prediction and evaluation system for vulnerability of coal floor water inrush[J]. China Energy and Environmental Protection, 2020,42(4): 22-27.

[8]陈军涛，郭惟嘉，尹立明，等. 深部开采底板裂隙扩展演化规律试验研究[J]. 岩石力学与工程学报，2016, 35(11)：2298-2306.

Chen Juntao, Guo Weijia, Yin Liming, et al. Experimental study of floor cracking under deep mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(11): 2298-2306.

[9]宋文成，梁正召，刘伟韬,等. 采场底板破坏特征及稳定性理论分析与试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(11):2208-2218.

Song Wencheng, Liang Zhengzhao, Liu Weitao, et al. Theoretical analysis and experimental investigation on failure characteristics and stability of stope floors[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(11): 2208-2218.

[10]施龙青,张荣遨,徐东晶,等. 基于 GWO-Elman 神经网络的底板突水预测[J]. 煤炭学报, 2020, 45(7):2455-2463.

Shi Longqing, Zhang Rongao, Xu Dongjing, et al.. Prediction of water inrush from floor based on GWO-Elman neural network［J］. Journal of China Coal Society, 2020, 45(7): 2455-2463.

[11]张玉军，张凤达，张志巍，等. 采动煤层底板层次性破坏特征全空间多参量协同监测[J]. 煤炭科学技术, 2022, (2): 86-94.

Zhang Yujun, Zhang Fengda, Zhang Zhiwei, et al. Full-space multi-parameter cooperative monitoring of failure hierarchy characteristics of coal seam floor[J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(2):

86-94.

[12]刘永生. 矿井底板采动应力演化规律与破坏特性研究[J]. 山西冶金, 2021, 44(2): 182-184.
Liu Yongsheng. Study on the Evolution of Mining Stress and Failure Characteristics of Mine Floor[J]. Shanxi Metallurgy, 2021, 44(2): 182-184.

[13]杨海平，刘盛东，杨彩，等. 煤层顶底板采动破坏同步动态监测电性特征分析[J]. 工程地质学报, 2021, 4: 1002-1009.
Yang Haiping, Liu Shengdong, Yang Cai, et al. Analysis of electrical characteristics of mining destruction on coal seam roof and floor with simultaneous dynamic monitoring method [J]. Journal of Engineering Geology, 29(4): 1002-1009.

[14]王琳，王广宏. 采场底板破坏特征数值模拟[J]. 煤矿安全, 2015, 46(7): 211-214.
Wang Lin, Wang Guanghong. Numerical Simulation on Failure Characteristics of Mining Coal Seam Floor[J]. Safety in Coal Mines, 2015, 46(7): 211-214.

[15]Shi L Q, Qiu M, Wang Y, et al. Evaluation of water inrush from underlying aquifers by using a modified water-inrush coefficient model and water-inrush index model: a case study in Feicheng coalfield, China. Hydrogeology Journal 2019, 27(6): 2105–2119.

[16]孙志强.采动覆岩应力变化规律分析[J]. 能源与环保，2019，41(9): 186-189.
Sun Zhiqiang． Analysis of stress change law of overlying strata caused by mining[J]. China Energy and Environmental Protection, 2019, 41(9) : 186-189.

[17]徐瑞朋，姜振泉，段宏飞，等.承压水上开采煤层底板破坏深度数值模拟及实测研究[J].矿业安全与环保，2012，39(3): 1-4.
Xu Ruipeng, Jiang Zhenquan, Duan Hongfei et al. Research on Numerical Simulation and Measurement of Damage Depth of Seam Floor under Confined Water Action[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2012, 39(3): 1-4.

[18]Liu S L, Liu W T and Yin D W. Numerical simulation of the lagging water inrush process from insidious fault in coal seam floor. Geotechnical and Geological Engineering. 2017, 35(3): 1013–1021.

[19]张凤达，申宝宏，康永华.煤层底板破坏机理分析及最大破坏深度计算[J].矿业安全与环保，2015，42(3): 58-61.
Zhang Fengda, Shen Baohong, Kang Yonghua. Failure Mechanism of Coal Seam Floor and Calculation of Maximum Breaks Depth[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2015, 42(3): 58-61.

[20]唐鑫，姜振泉，雷娟，等.深部开采煤层底板采动变形破坏规律研究[J].矿业安全与环保，2013，40(4): 8-10.
Tang Xin, Jiang Zhenquan, Lei Juan et al. Study on Floor Deformation and Failure Law of Deep Mining Coal Seam[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2013, 40(4): 8-10.

[21]陈洋.大同矿区特厚煤层采动底板变形及破坏深度研究[D].徐州，中国矿业大学，2021.
Chen Yang. Study on Deformation and Failure Depth of Mining Floor in Extra-thick Coal Seam of Datong Mining Area[J]. Xu Zhou, China University of Mining & Technology, 2021.

[22]徐芝纶.弹性力学简明教程[M].北京：高等教育出版社，1979.
Xu Zhilun. A concise course in elasticity[M]. Beijing: Higher Education Press, 1979.

[23]国家市场监督管理总局，国家标化管理委员会. 矿区水文地质工程地质勘查规范[S]. GB/T 12719—2021.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration. Exploration specification of hydrogeology and engineering geology in mining areas[S]. GB/T 12719-2021.

[24]张学科，李光范. 材料力学[M].北京：中国水利水电出版社，2015.
Zhang Xueke, Li Guangfan. Mechanics of materials[M]. Beijing: China WaterPower Press, 2015.