

基于仿真驱动的超宽对拉工作面底板破坏深度智能优化方法

尹会永^{1,2},高德瑞^{1,2},李永杰^{1,2},董方营^{1,2},张历峰³,吴 焘³,张 超⁴,王凡华⁴,王永军⁵

(1. 山东科技大学 地球科学与工程学院,山东 青岛 266590;

2. 山东科技大学 露天煤矿灾害防治与生态保护全国重点实验室,山东 青岛 266590;

3. 枣庄矿业(集团)有限责任公司 滨湖煤矿,山东 枣庄 277515;

4. 枣庄矿业(集团)有限责任公司,山东 枣庄 277099; 5. 兖矿能源集团股份有限公司,山东 济宁 273500)

摘要:精准计算煤层底板破坏深度对保障煤矿安全生产至关重要,但在超宽工作面开采条件下,仍是一项关键工程难题。针对滨湖煤矿21609对拉工作面底板破坏深度难以定量计算的问题,采用FLAC^{3D}数值模拟构建8因素正交试验方案,分析工作面斜长、采深、采高、合理错距、切顶高度、顶板岩性组合、底板岩性组合及煤层倾角对底板破坏深度的影响规律。基于正交试验极差分析结果,构建底板破坏深度初始经验公式,并采用多策略协同改进蜣螂优化算法(MSIDBO)对经验公式的修正系数进行寻优,得到优化后的底板破坏深度经验公式。进一步依据工作面斜长变化及回采推进过程,对21609对拉工作面开展分区参数寻优。优化后经验公式计算结果的相对误差分别为6.4%、5.6%和6.7%,较初始经验公式误差明显降低,说明MSIDBO能够有效修正初始经验公式的计算偏差。总体来看,MSIDBO优化后的底板破坏深度经验公式具有较好的计算精度、泛化能力和工程适用性,可为深部采煤工作面底板破坏深度计算、开采参数优化及水害防治提供参考。

关键词:底板破坏深度;超宽对拉工作面;蜣螂优化算法;多策略协同改进;微震-电法监测系统

中图分类号:TD745

文献标志码:A

Simulation-driven intelligent optimization method for floor failure depth in ultra-wide double-unit mining faces

YIN Huiyong^{1,2}, GAO Derui^{1,2}, LI Yongjie^{1,2}, DONG Fangying^{1,2}, ZHANG Lifeng³,
WU Tao³, ZHANG Chao⁴, WANG Fanhua⁴, WANG Yongjun⁵

(1. College of Earth Science and Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

2. State Key Laboratory of Disaster Prevention and Ecology Protection in Open-pit Coal Mines, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China; 3. Binhu Coal Mine, Zaozhuang Mining (Group) Co., Ltd.,

Zaozhuang 277515, China; 4. Zaozhuang Mining (Group) Co., Ltd., Zaozhuang 277099, China;

5. Yankuang Energy Group Company Limited, Jining 273500, China)

Abstract: Accurate calculation of the failure depth of a coal seam floor is essential for ensuring coal mine safety. However, achieving accurate calculations under ultra-wide working face mining conditions remains a key engineering challenge. To address the difficulty in quantitatively calculating the floor failure depth of the 21609 double-unit working face in Binhu Coal Mine, an eight-factor orthogonal test scheme was established using FLAC^{3D} numerical simulation. The influence laws of working face length, mining depth, mining height,

收稿日期:2025-08-08

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2019MD013)

作者简介:尹会永(1979—),男,河北故城人,教授,博士生导师,主要从事矿山水文地质、水害防治与环境地质的研究。

李永杰(1999—),男,江苏徐州人,博士研究生,主要从事人工智能与大数据驱动的水害预测与预警系统研究,本文通信作者。 E-mail:yongjie.li@sdust.edu.cn

reasonable staggered distance, roof-cutting height, roof lithology combination, floor lithology combination, and coal seam dip angle on floor failure depth were analyzed. Based on the range analysis results of the orthogonal tests, an initial empirical formula for floor failure depth was constructed, and the correction coefficients of the empirical formula was optimized by adopting a multi-strategy improved dung beetle optimizer (MSIDBO), thereby obtaining an optimized empirical formula for floor failure depth. The zoning parameter optimization for the 21609 double-unit working face was carried out according to the variation in working face length and mining advance process. The relative errors of the optimized empirical formula were 6.4%, 5.6%, and 6.7% respectively, which were significantly lower than those of the initial empirical formula, indicating that MSIDBO can effectively correct the calculation deviation of the initial empirical formula. In conclusion, the MSIDBO-optimized empirical formula for floor failure depth exhibits better calculation accuracy, generalization capability, and engineering applicability, and can provide a reference for floor failure depth calculation, mining parameter optimization, and water hazard prevention in deep coal mining working faces.

Key words: failure depth of coal seam floor; ultra-wide double-unit mining faces; dung beetle optimizer; multi-strategy synergistic improvement; microseismic-electrical monitoring

煤层开采水害防治是矿山安全生产的核心任务,其中底板水害因具隐蔽性、突发性和强破坏性,已成为深部煤炭资源开采的关键地质问题^[1-2]。随着开采深度的增加,底板承受的水压持续升高,特别是大采宽工作面受到开采扰动后底板岩层的破坏效应显著增强,破坏深度呈非线性增长,煤层底板高压水体通过断层、裂隙带或岩溶陷落柱等通道突破底板隔水层,引发灾难性突水事故,严重威胁矿工生命安全与矿区生态环境稳定^[3-4]。因此,精确预测复杂地质条件下大采深超宽对拉工作面底板破坏深度,对突水防控与安全开采具有决定性意义^[5]。

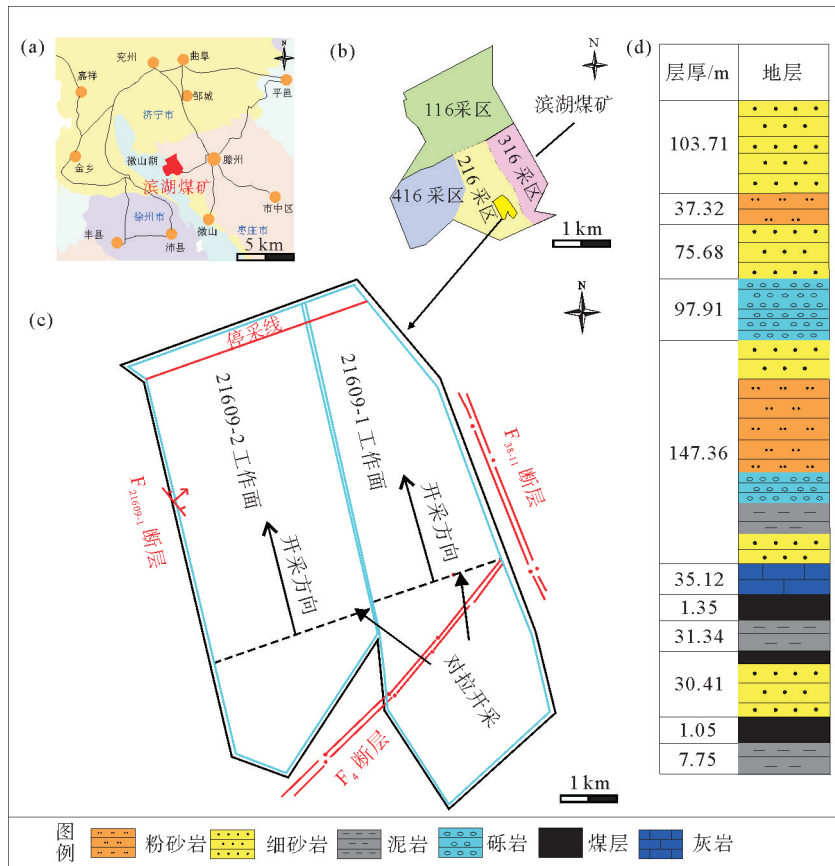
针对底板突水危险性的预测,传统方法如室内相似模拟试验、脆弱性指数及突水系数等理论长期发挥重要作用,取得了诸多关键成果^[6],但也存在一定局限,如室内试验法难以复现原位地质结构、真实应力环境及时间效应,理论计算法则难以精确表征复杂地质水文条件及多场耦合效应^[7]。近年来,智能优化算法和数据驱动方法被引入矿井水害预测和底板破坏深度计算中,为复杂非线性问题提供了新的研究途径^[8-9]。但现有智能算法普遍依赖样本数量和数据质量,且部分方法存在指标权重确定主观性强、机理解释不足、参数寻优易陷入局部最优等问题。如李刚等^[10]提出的模拟退火-粒子群优化-反向传播神经网络(simulated annealing-particle swarm optimization-back propagation, SA-PSO-BP),虽通过优化避免了局部极小值,但 BP 模型对初始权重较为敏感,在小样本和复杂地质条件下稳定性仍然不足;施龙青等^[11]采用的主成分分析-灰狼算法-反向传播神经网络(principal component analysis-grey wolf optimizer-back propagation, PCA-GWO-BP)进行底板突水判识,但主成分降维过程可能造成关键非线性地质信息损失;Gao 等^[12]利用遗传算法(genetic algorithm, GA)对支持向量回归(support vector regression, SVR)参数优化,建立底板破坏深度主成分分析-遗传算法-支持向量回归(principal component analysis-genetic algorithm-support vector regression, PCA-GA-SVR)计算模型,在小样本条件下具有一定优势,但模型参数和核函数选择仍会影响计算精度。

针对现有方法的缺陷,本研究以滨湖煤矿 21609 对拉工作面为研究对象,采用数值模拟与正交实验,系统量化工作面斜长、采深、采高、工作面错距、切顶高度、顶板岩性组合、底板岩性组合及煤层倾角 8 个因素的影响。通过拉丁超立方采样、改进 Sigmoid 非线性因子、正余弦搜索策略和多种群差分变异机制,构建多策略协同改进的蜣螂优化算法(multi-strategy improved dung beetle optimizer, MSIDBO),提高算法全局搜索能力和局部寻优精度,并采用 MSIDBO 对经验公式修正系数进行寻优,得到优化后的底板破坏深度经验公式。在工程应用中,开展分区工程参数寻优,并利用微震-电法联合监测对计算结果进行检验。研究成果可为煤层底板破坏深度的精确计算提供理论依据和技术支撑。

1 工作面概况

滨湖煤矿地处滕县煤田西北部,位于山东省滕州市滨湖镇,东距滕州市约 20 km。216 采区为滨湖煤

矿—465 m 水平的延伸开拓采区,位于井田东南部。其中,21609 对拉工作面位于 216 采区南侧,由 21609(上)工作面和 21609(下)工作面构成。该工作面走向长 650~1 266 m,倾斜长 152~392 m,地面标高 +32~+36 m,工作面标高 -459.7~-491.5 m,面积 334 066.6 m²。开采煤层走向 90°~214°,倾向 180°~304°,产状平缓,局部略有起伏,厚度 1.34~1.36 m。煤层结构简单,煤层倾角 3°~5°,平均 4°。16 煤层直接顶为灰岩,基本顶为泥岩,为稳定顶板;16 煤直接底为泥岩,基本底为灰岩(图 1)。



(a) 滨湖煤矿位置; (b) 216 采区及 21609 工作面位置; (c) 研究区构造地质图; (d) 钻孔柱状图

图 1 研究区位置、构造及地层柱状图

Fig. 1 Location, structure and stratigraphic histogram of the study area

工作面掘进过程中未发现岩浆岩体、冲刷带和陷落柱等。工作面东侧发育 F_{38-11} 断层,为 216 采区的边界,断层倾向 65°~70°,落差 20~35 m,走向 NWW,倾向 NNE,区内延展长度 720 m,该断层上部错断侏罗系,下部错断奥灰含水层。南侧发育 F_4 断层,断层倾向 60°,落差 0~4 m,断层带破碎程度和破碎空间均较小,破碎带发育程度较弱,对回采影响较大。西侧发育 $F_{21609-1}$ 断层,断层倾向 45°,落差 1 m,不含水、不导水,对回采影响程度较小。

2 底板破坏深度数值模拟

2.1 计算模型的建立

选取滨湖煤矿 21609 对拉工作面为研究对象,采用 FLAC^{3D} 数值模拟软件建立数值模型,分析不同工作面斜长、采深、采高、工作面错距、切顶高度、顶板岩性组合、底板岩性组合及煤层倾角 8 个主控因素对采场底板破坏深度的影响。

基于 21609 工作面实测数据,建立 600 m×800 m×240 m 三维模型,采用 Mohr-Coulomb 弹塑性本构模型及横观各向同性材料表征岩体层理特性。初始应力场耦合自重应力与构造应力,设置开采厚度为 1.5 m、深度 530 m,底部奥陶系灰岩含水层施加 3.0 MPa 水压。边界条件:模型底部及两侧设置为零位

移边界,顶部施加 7.15 MPa 等效覆岩载荷,渗流-应力耦合基于 Biot 理论。开挖分 24 级台阶推进,切顶区域置换为破碎岩体(参数见表 1)。

表 1 研究区岩体物理力学参数表

Table 1 Physical and mechanical parameters of rock mass in the study area

序号	岩层	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/ GPa	泊松比	体积模量/ GPa	剪切模量/ GPa	内聚力/ MPa	摩擦角/ ($^{\circ}$)	抗拉强度/ MPa
1	煤层	2 698	1.16	0.32	1.07	0.44	3.1	29	0.64
2	灰岩	2 746	13.02	0.24	8.35	5.25	11.8	32	5.31
3	砂质泥岩	2 758	10.23	0.17	5.17	4.37	3.5	38	2.01
4	泥岩	2 686	7.86	0.19	4.23	3.30	3.6	37	1.96
5	细砂岩	2 750	8.46	0.17	4.27	3.62	6.8	36	6.80
6	中砂岩	2 687	12.11	0.29	9.61	4.69	6.4	35	5.59
7	砾岩	2 410	8.92	0.22	2.75	2.38	7.5	35	6.20

2.2 正交数值模拟试验

为综合研究影响底板破坏深度的影响因素,采用 FLAC^{3D} 数值模拟软件对工作面斜长、采深、采高、工作面错距、切顶高度、顶板岩性组合、底板岩性组合、煤层倾角 8 个因素进行研究,每个因素选择 5 个不同数值:其中,工作面斜长分别为 100、200、300、400、500 m;采深为 400、450、500、550、600 m;采高为 1.5、1.6、1.7、1.8、1.9 m;工作面错距为 0、5、10、15、20 m;切顶高度为 5、10、15、20、25 m;顶板岩性组合为 1、2、3、4、5,分别指软岩(泥岩)与硬岩(砂岩、灰岩、岩浆岩等)比例为 4:0、3:1、2:2、1:3、0:4 的岩性组合,顶板岩体的总厚度为 40 m;底板岩性组合为 1、2、3、4、5,分别指软岩与硬岩比例为 4:0、3:1、2:2、1:3、0:4 的岩性组合,底板岩体的总厚度为 40 m;煤层倾角为 1°、2°、3°、4°、5°。采用正交试验设计方法,构建 8 因素 5 水平的试验方案。此设计仅需 33 次数值模拟试验即可获取具有代表性的结果,显著提升研究效率。具体试验数据见表 2。如图 2 所示为试验编号为 1、11、21、31 的数值模拟底板塑性区破坏云图,其中:none 为无应力破坏区;shear 为剪切破坏单元;tension 是张拉破坏单元;n 代表 now,表示当前循环中出现;p 代表 previous,表示在以前的循环中出现。

表 2 因素水平表

Table 2 Factors and levels

水平	工作面斜长/m	采深/m	采高/m	工作面错距/m	切顶高度/m	顶板岩性组合	底板岩性组合	煤层倾角/($^{\circ}$)
1	100	400	1.5	0	5	1	1	1
2	200	450	1.6	5	10	2	2	2
3	300	500	1.7	10	15	3	3	3
4	400	550	1.8	15	20	4	4	4
5	500	600	1.9	20	25	5	5	5

对正交试验数据采用两种方法分析,分别是极差分析与方差分析。其中,极差分析是一种直观式分析方法,具有计算简单、形象直观、简单易懂等优点,也是正交试验结果最常用的分析方法。评价标准通过 R 值(极差值)进行评价;通过 K_{avg} 值,即每个因素不同取值时试验数据的平均值,得到水平优劣的对比。综合所有因素的最优取值,即可确定最佳试验条件组合。

表 3 为底板破坏深度影响因素正交试验极差分析表,其中 K_{avg} 为各因素对应取值时试验数据的平均值,由表 3 数据分析可知: R_L (工作面斜长) $>R_Q$ (切顶高度) $>R_S$ (工作面错距) $>R_F$ (底板岩性组合) $>R_T$ (顶板岩性组合) $>R_I$ (煤层倾角) $>R_D$ (采深) $>R_M$ (采高),表明影响底板破坏深度的主要因

素是工作面斜长,切顶高度、工作面错距、底板岩性组合、顶板岩性组合、煤层倾角、采深等因素依次减弱,采高最差。

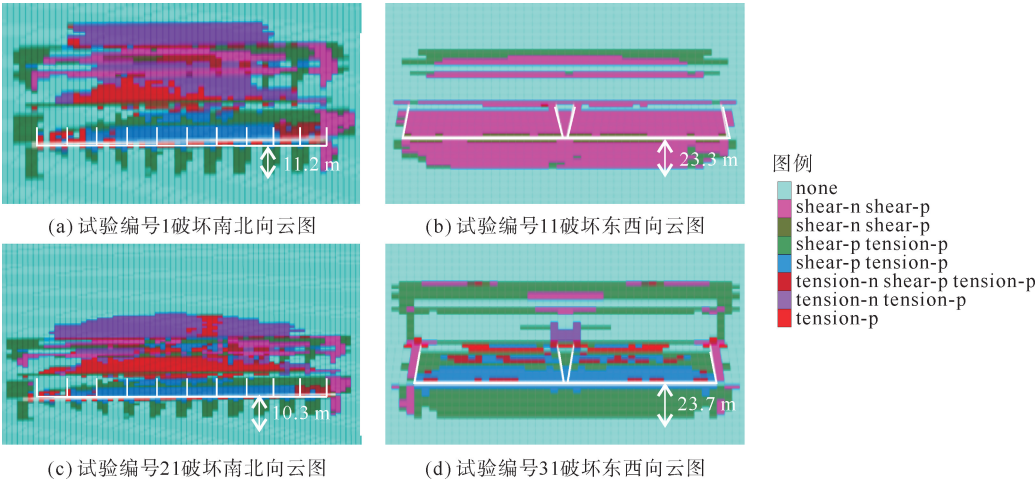


图 2 底板塑性区破坏云图
Fig. 2 Contour plot of plastic zone failure in the floor

表 3 底板破坏深度影响因素正交试验极差分析表

Table 3 Orthogonal test range analysis of influence factors of floor failure depth

项	水平	工作面斜长/m	采深/m	采高/m	工作面错距/m	切顶高度/m	顶板岩性组合	底板岩性组合	倾角/(°)
K _{avg} 值	0	—	—	—	32.3	—	—	—	—
	1	—	—	—	—	—	19.7	31.3	21.9
	1.5	—	—	22.9	—	—	—	—	—
	1.6	—	—	23.0	—	—	—	—	—
	1.7	—	—	23.2	—	—	—	—	—
	1.8	—	—	24.3	—	—	—	—	—
	1.9	—	—	25.4	—	—	—	—	—
	2	—	—	—	—	—	21.5	27.5	22.6
	3	—	—	—	—	—	23.2	23.5	23.1
	4	—	—	—	—	—	24.1	22.7	23.7
	5	—	—	—	22.3	24.0	26.4	21.8	25.4
	10	—	—	—	25.9	22.8	—	—	—
	15	—	—	—	27.9	20.2	—	—	—
	20	—	—	—	30.4	13.6	—	—	—
	25	—	—	—	—	10.3	—	—	—
	100	11.2	—	—	—	—	—	—	—
	200	19.8	—	—	—	—	—	—	—
	300	22.5	—	—	—	—	—	—	—
	400	23.6	21.6	—	—	—	—	—	—
	450	—	22.4	—	—	—	—	—	—
	500	25.8	22.9	—	—	—	—	—	—
	550	—	23.2	—	—	—	—	—	—
	600	—	24.9	—	—	—	—	—	—
R		14.6	3.3	2.5	10.0	13.7	6.7	9.5	3.5

比较各因素与底板破坏深度的关系(图3)可知,工作面斜长增大导致煤层底板破坏深度显著增加,破坏机理为采空区范围扩大促使顶板裂隙发育和垮落带增高,对底板形成叠加扰动,加剧了底板裂隙扩展和动载效应,使底板应力水平显著提升,最终增大破坏深度。采深的增加同样会显著加剧底板破坏。上覆岩层自重应力增大导致底板应力场复杂化,破坏深度也随之增加,且采高与底板破坏深度呈明显的正相关关系,顶板垮落高度增大引发的矿压集中效应是主要诱因。工作面错距对底板破坏深度的影响呈独特的双峰效应特征,当错距小于10 m时,破坏深度随错距的增大而减小,这主要归因于应力集中的缓解;而当错距超过10 m时,由于岩层连续性遭到破坏,破坏深度却随错距的增大而增加。在顶板与底板岩性组合方面,顶板强度增大导致的应力集中加剧以及底板强度降低引发的抗破坏能力减弱,均会显著增加破坏深度。此外,煤层倾角增大不仅会诱发工作面端部应力集中,还会促进底板剪切滑移,并最终导致破坏深度显著增加。通过正交试验验证,各因素与破坏深度的定量关系如图3所示,展示了各因素对底板破坏深度的影响程度,并为预测模型的构建提供了依据。

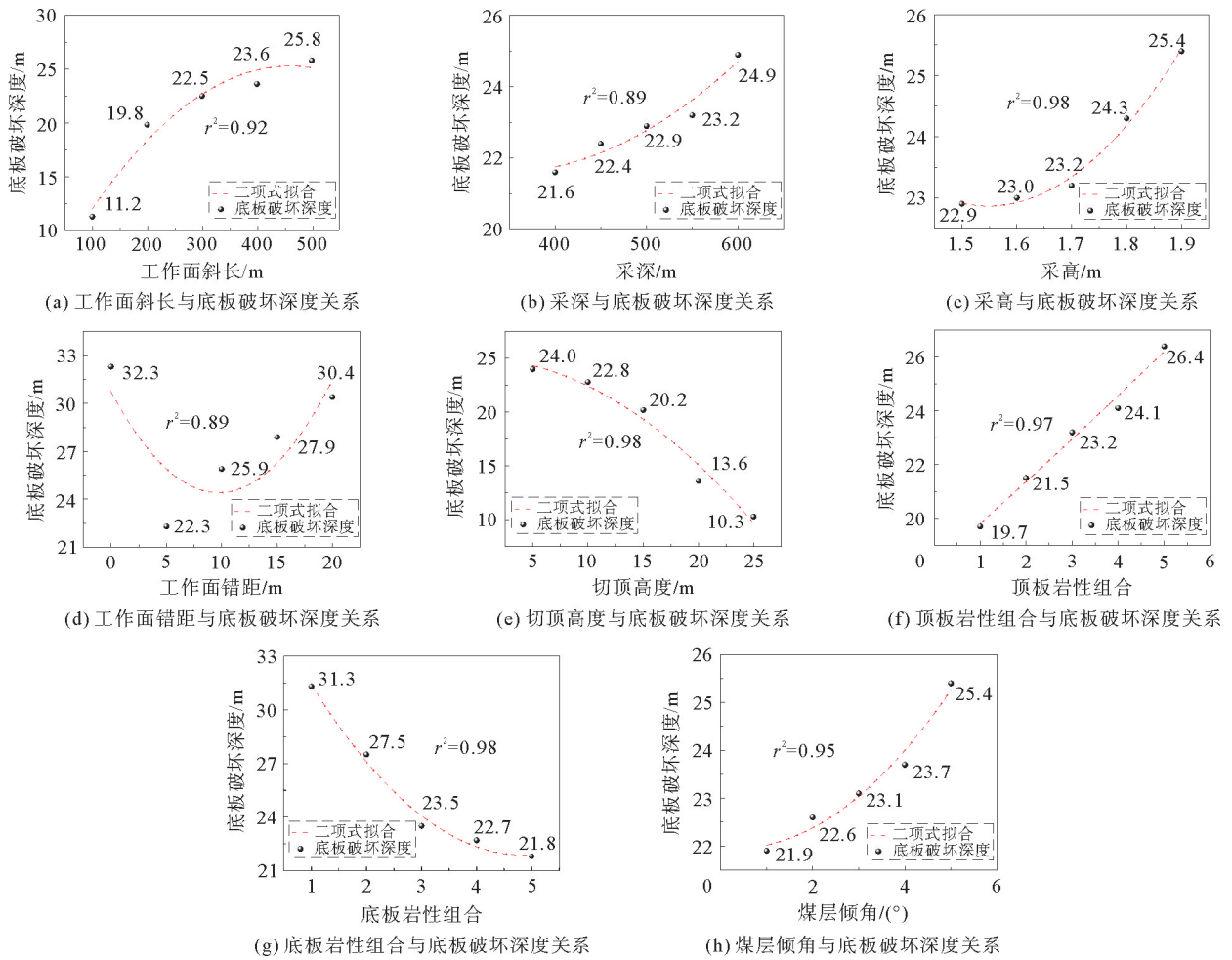


图3 8因素与底板破坏深度关系曲线

Fig. 3 Relationship curve between the eight factors and floor failure depth

2.3 多策略协同改进蜣螂优化算法

蜣螂优化算法(dung beetle optimizer, DBO)是由Xue等^[13]2022年提出的新型群体智能算法,灵感源自蜣螂的自然行为。该算法通过模拟蜣螂种群中滚球蜣螂、育雏球、幼虫蜣螂和小偷蜣螂四种角色的动态行为,实现高效的全局探索和局部开发能力,在收敛速度和优化精度上表现优异,尤其适用于解决复杂优化问题。

目前,MSIDBO算法研究较为广泛。其中,拉丁超立方采样与精英种群策略可以解决传统随机初始

化导致的初始种群分布不均、种群多样性不足以及早期搜索质量不稳定等问题^[14]；基于改进 sigmoid 函数的非线性控制因子 φ 可以解决算法迭代过程中全局探索与局部开发转换不平滑、搜索阶段平衡能力不足的问题^[15]；融合正余弦算法的搜索策略改进可以解决滚球蜣螂搜索机制单一、全局探索能力不足以及易陷入局部最优的问题^[16]；融合多种差分进化方式的多种群变异策略可以解决算法后期种群多样性下降、候选解更新不足以及局部最优逃逸能力弱的问题^[17]。通过初始化、搜索平衡、搜索策略和变异机制四个维度改进 DBO 算法，可缓解全局探索与局部开发不平衡、收敛速度慢和易陷入局部最优等问题，提升算法收敛速度和优化精度，尤其适用于地质数据反演、工程设计优化等复杂非线性优化问题。

为评估 MSIDBO 算法的优化性能，基于 Matlab 2024a 平台，选取 CEC2017 测试集中的单峰及简单多模态基准函数进行消融实验，系统验证各改进策略的有效性。其中，DBO 为原 DBO 算法；LEDBO 为引入初始化策略的 DBO 算法；IsigDBO 为采用非线性控制因子 φ 的 DBO 算法；SincDBO 为引入正余弦震荡的 DBO 算法；MGDBO 为融合多种差分进化方式的多种群变异策略的 DBO 算法。

消融实验结果表明(图 4)，各改进策略均显著提升了算法性能，但不同阶段的优化机制存在差异。由 F_3 测试函数可见(图 4(a))，LEDBO 增强了全局搜索，但局部调整不足；由 F_4 和 F_5 测试函数可见(图 4(b)、图 4(c))，IsigDBO 平衡探索开发，但前期局部寻优受限； F_{10} 测试函数中(图 4(d))，SincDBO 强化局部搜索，但易陷于局部最优；MGDBO 引入多样算子，但初始欠佳。图 4(e)~图 4(h)代表各测试函数的迭代结果。因此，MSIDBO 通过多策略协同机制，可以实现全局与局部搜索的均衡，大幅提升预测精度与稳定性。

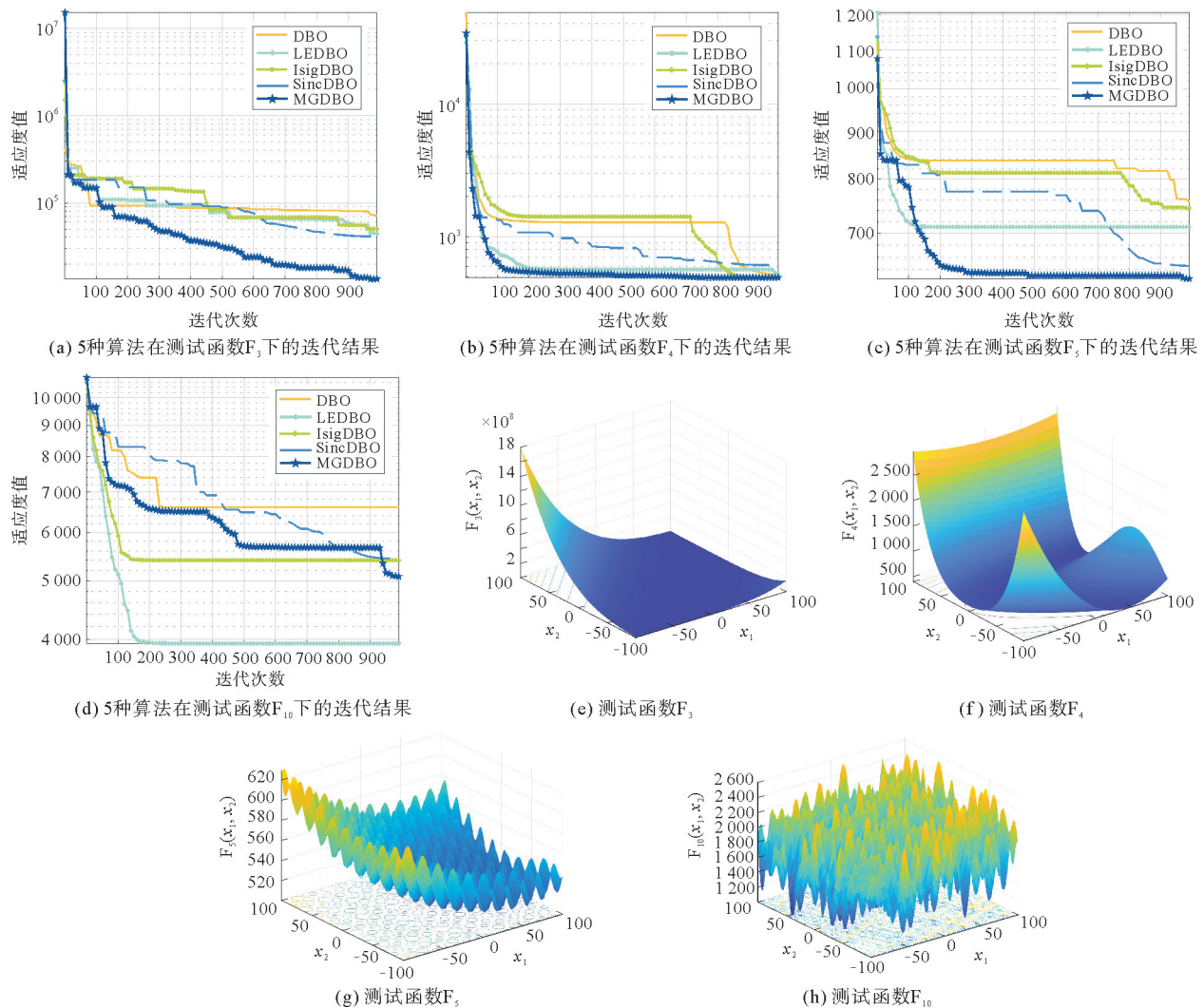


图 4 消融实验中不同算法的测试结果

Fig. 4 Test results of different algorithms in the ablation experiment

2.4 基于正交极差权重的底板破坏深度初始经验公式

由正交数值模拟结果可知,工作面斜长、采深、采高、错距、切顶高度、顶板岩性组合、底板岩性组合及煤层倾角均会对底板破坏深度产生影响,但不同因素的影响程度存在明显差异。依据各因素极差值构建权重系数,并结合各因素不同水平下的 K_{avg} 值建立底板破坏深度初始经验公式。

根据各因素的工程可控性及地质赋存属性,将 8 个因素划分为工程可控变量和固定工况参数。将工作面采高(M)、错距(S)和切顶高度(Q)作为工程可控变量,将工作面斜长(L)、采深(D)、顶板岩性组合(T)、底板岩性组合(F)和煤层倾角(I)作为固定工况参数。

工程可控变量取值范围为:

$$\begin{cases} 1.5 \leq M \leq 1.9, \\ 0 \leq S \leq 20, \\ 5 \leq Q \leq 25. \end{cases} \quad (1)$$

式中, M 、 S 、 Q 的单位均为 m。上述取值范围由工作面的布置条件、煤层厚度、错距及切顶施工条件共同确定,限定经验公式在工程合理范围内进行底板破坏深度计算。

根据表 3,工作面斜长、采深、采高、错距、切顶高度、顶板岩性组合、底板岩性组合以及煤层倾角的极差值分别为 14.6、3.3、2.5、10.0、13.7、6.7、9.5、3.5。

第 i 个因素的权重 ω_i 为:

$$\omega_i = \frac{A_i}{\sum_{i=1}^8 A_i} \quad (2)$$

由式(2)得到各因素的权重 $\omega = (0.2288, 0.0517, 0.0392, 0.1567, 0.2147, 0.1050, 0.1489, 0.0549)$ 。

为消除不同因素量纲的差异,并保留各因素水平变化对应的响应特征,基于 K_{avg} 值构建单因素响应函数 $f_i(a_i)$,并采用分段线性插值确定不同取值时的响应值。其无量纲形式为:

$$z_i(a_i) = \frac{f_i(a_i) - f_{i\min}}{f_{i\max} - f_{i\min}} \quad (3)$$

式中: $z_i(a_i)$ 为第 i 个因素的无量纲响应因子; $f_{i\max}$ 与 $f_{i\min}$ 分别为该因素响应函数的最大值和最小值。

参数组合 $\mathbf{b} = (b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5, b_6, b_7, b_8)$,据此建立底板破坏深度初始经验公式:

$$\begin{aligned} d = & b_0 + 0.2288b_1z_1(L) + 0.0517b_2z_2(D) + 0.0392b_3z_3(M) + 0.1567b_4z_4(S) + \\ & 0.2147b_5z_5(Q) + 0.1050b_6z_6(T) + 0.1489b_7z_7(F) + 0.0549b_8z_8(I). \end{aligned} \quad (4)$$

式中: d 为底板破坏深度,m; b_0 为待优化基准项; b_i 为第 i 个因素对应的修正系数。

2.5 基于 MSIDBO 的经验公式参数优化

本研究采用 MSIDBO 算法对式(5)中的参数进行寻优。MSIDBO 以 $J(b_i)$ 最小为目标,对经验公式参数组合 $\mathbf{b}$ 进行寻优,得到最优参数组合 $\mathbf{b}^*$ 。

以 n 组种群数量为样本,构建目标函数:

$$J(b_i) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (d_k - d_k^*)^2} + q_c P_c + q_t P_t \quad (5)$$

式中: n 为种群数量, d_k 为第 k 组 FLAC^{3D} 数值模拟得到的底板破坏深度, d_k^* 为经验公式计算值, p_c 为参数边界惩罚项, p_t 为趋势约束惩罚项, q_c 和 q_t 为惩罚系数。

MSIDBO 参数设置为:种群规模 $N=30$,最大迭代次数 $T_{\max}=500$,优化变量维度为 9。为降低随机性的影响,算法独立运行 30 次,取目标函数值最小的一组参数作为最终优化参数。当迭代次数达到 $T_{\max}$ 或连续 20 次迭代目标函数变化量小于 10^{-6} 时,停止迭代。

经 MSIDBO 寻优后,得到最优参数组合

$$\mathbf{b}^* = (b_0^*, b_1^*, \dots, b_8^*) \quad (6)$$

将式(6)代入式(4)得到优化后的底板破坏深度经验公式:

$$d^* = b_0^* + \sum_{i=1}^8 b_i^* \omega_i \varepsilon_i(a_i) \quad (7)$$

式中: d^* 为优化后的底板破坏深度, m; b_0^* 为 MSIDBO 优化得到的基准项; b_i^* 为第 i 个因素对应的优化修正系数。

3 开采参数优化结果

3.1 基于工作面斜长变化的工程物探检验分区

21609 对拉工作面受断层构造、矿区边界及工作面布置条件的影响, 工作面斜长沿回采方向变化明显, 导致采场跨度、覆岩运动范围、支承压力分布和底板扰动强度具有空间差异。因此, 单一区域微震-电法解释结果难以代表整个工作面底板破坏特征。依据工作面斜长变化特征及回采推进过程, 可将研究区划分为三个区段: I 段为宽面区, 工作面斜长接近最大值, 主要反映全宽面条件下始采阶段底板破坏特征; II 段为过渡区, 局部斜长随推进逐渐缩短, 主要反映面长变化过程中的底板破坏特征; III 段为窄面区, 工作面斜长减小并趋于稳定, 主要反映窄面阶段底板破坏特征(表 4、图 5)。在三个区段中各选取一个特征导线点, 以代表本区域的地质特征, 工程物探检验分区如图 5 所示。表 4 为不同区段固定工况参数及工程可控参数寻优结果。

表 4 不同区段参数寻优结果

Table 4 Parameter optimization results for different zones

区段	固定工况参数	最优底板破坏深度 d^*/m	最优开采参数/m		
			最优采高 M	最优错距 S	最优切顶高度 Q
I 段	$L=389\text{ m}$ $T=5$ $F=3$ $D=465\text{ m}$ $I=3.1^\circ$	30.1	1.52	4.1	6.1
II 段	$L=344\text{ m}$ $T=5$ $F=3$ $D=466\text{ m}$ $I=3.3^\circ$	28.3	1.56	3.8	5.7
III 段	$L=291\text{ m}$ $T=5$ $F=3$ $D=471\text{ m}$ $I=3.4^\circ$	27.1	1.55	3.9	5.8

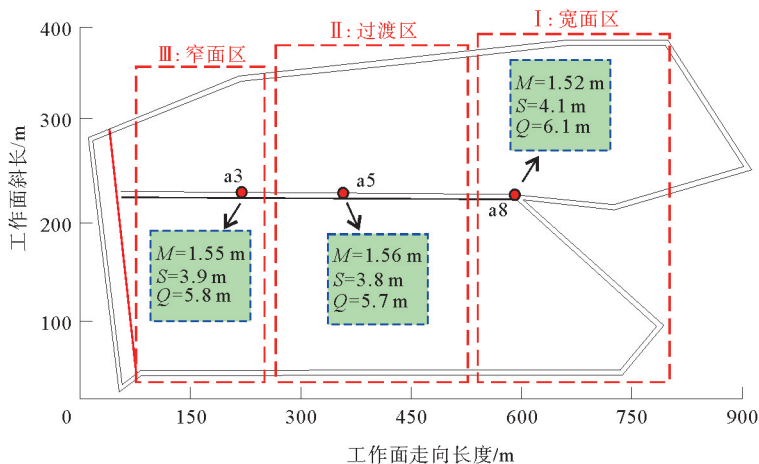


图 5 工程物探检验分区示意图

Fig. 5 Schematic diagram of zoning for engineering geophysical verification

由表 4 可知,在各区段固定工况参数确定后,采用优化后的底板破坏深度经验公式对底板破坏深度进行寻优,得到满足现场回采工艺、错距设计及切顶施工条件的工程合理参数组合。其中,Ⅰ段最优参数为 $M=1.52$ m、 $S=4.1$ m、 $Q=6.1$ m,对应底板破坏深度为 30.1 m;Ⅱ段最优参数为 $M=1.56$ m、 $S=3.8$ m、 $Q=5.7$ m,对应底板破坏深度为 28.3 m;Ⅲ段最优参数为 $M=1.55$ m、 $S=3.9$ m、 $Q=5.8$ m,对应底板破坏深度为 27.1 m。整体来看,三个区段最优参数变化幅度较小,说明该工作面的工程参数组合具有一定稳定性。

3.2 微震-电法联合监测

实测法是确定底板破坏深度的最精准手段^[18-19]。21609 工作面采用微震-电法突水监测预警系统进行实时监测,如图 6(a)所示。该技术通过空间分布式微震传感器自动探测地震事件,触发后连续存储波形数据,基于人工神经网络算法实现事件自动定位与能量计算,并对时间段内的微震事件进行统计分析。在 21609 工作面底板微震-电法监测系统中,上材料巷、运输巷及下材料巷同步部署电法与微震监测网络,其中共布设测线 1 725 m,配置 128 个电极、8 个采集分站以及 48 个传感器。部署位置如图 6(b)所示,监测系统电极及传感器安装剖面示意图如图 6(c)、图 6(d)所示,井下仪器布设实物图如图 6(e)、图 6(f)所示。

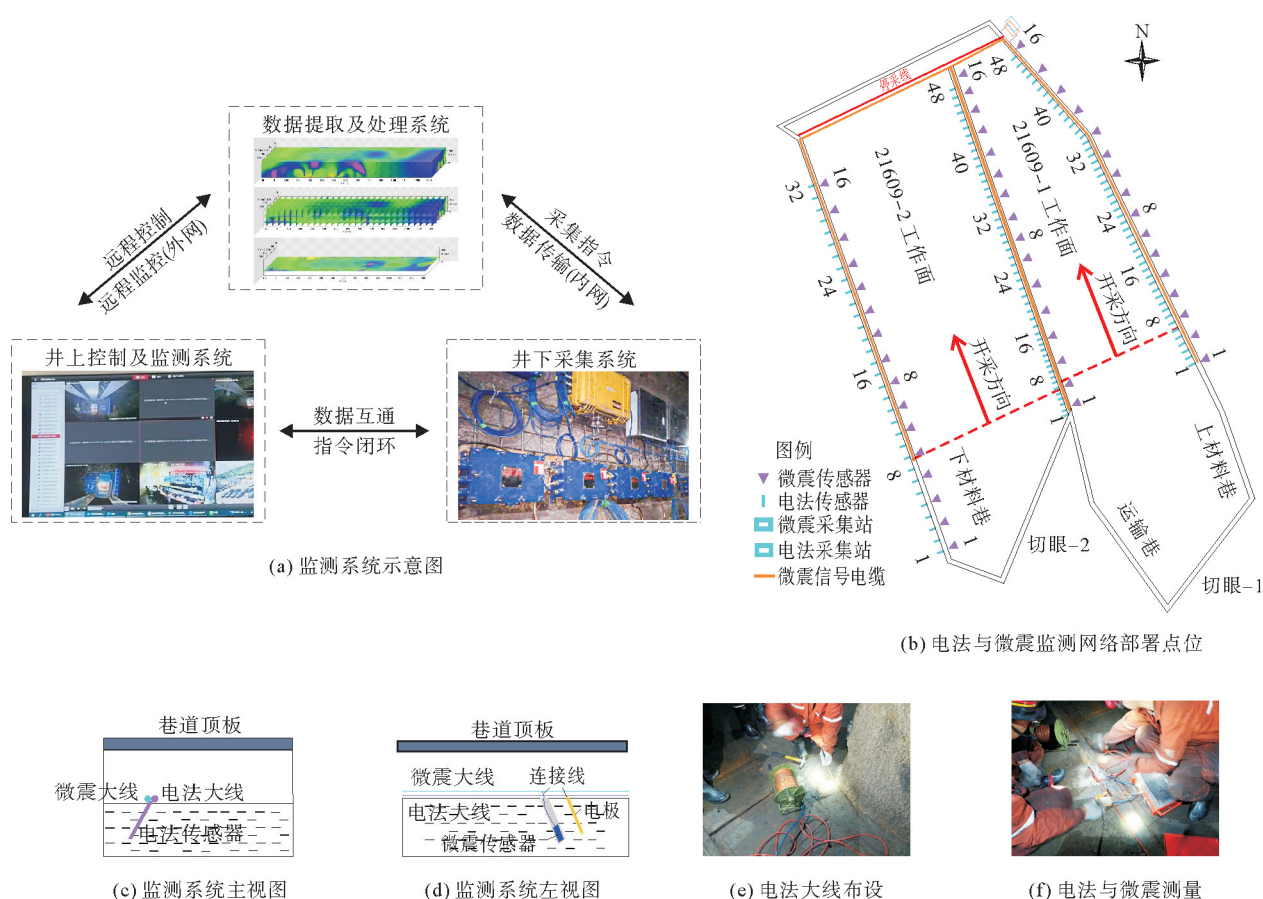


图 6 微震-电法监测系统布置图

Fig. 6 Layout diagram of the microseismic-electrical monitoring system

图 7 为微震事件在上材料巷、下材料巷和运输巷剖面上的空间分布。由图 7 可知,工作面回采初期微震事件发育深度较大,主要集中在底板 0~35 m,原因在于开采初期预裂爆破切顶效果尚未充分显现,采动应力集中程度较高,底板受扰动影响较强,因而破坏深度相对较大。

随着工作面持续推进,覆岩与底板应力逐步释放,采动破坏深度趋于稳定。根据监测结果,Ⅰ段、Ⅱ段和Ⅲ段底板破坏深度分别为 28.3、26.8 及 25.4 m,反映了底板破坏深度由回采初期的相对较大逐渐过渡到稳定状态。

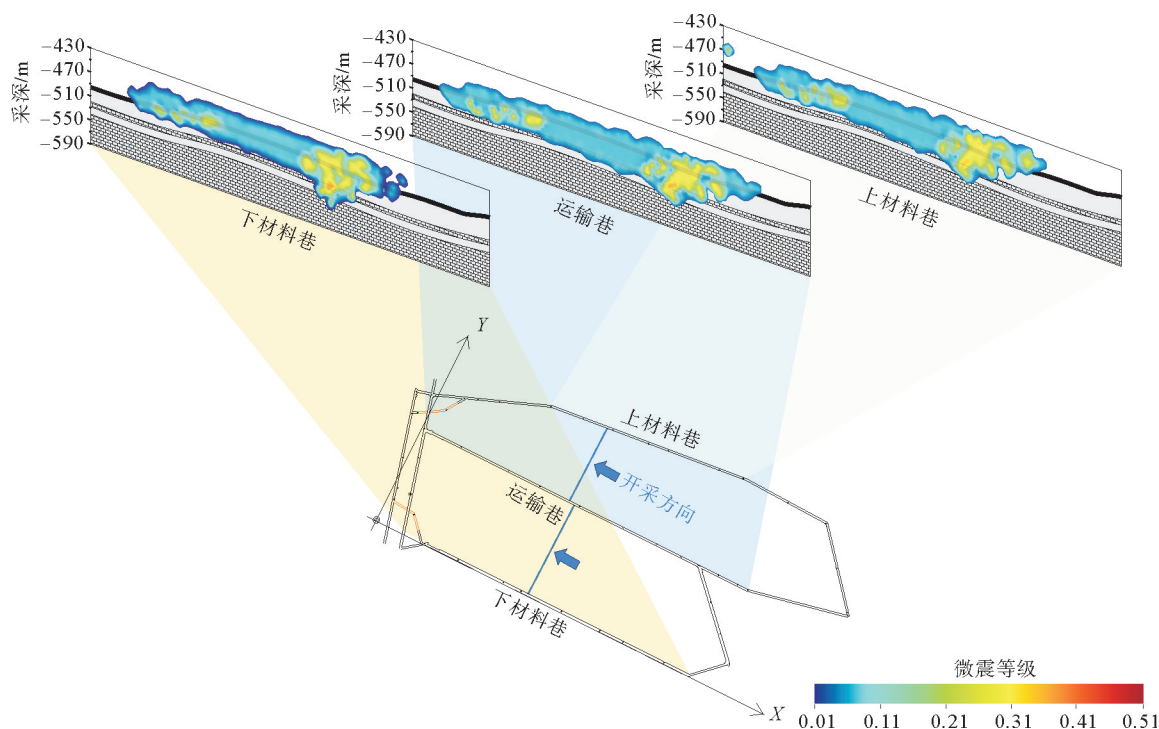


图 7 微震事件剖面分布图

Fig. 7 Microseismic-electrical event profile distribution

为进一步验证不同区段固定工况参数及工程可控参数寻优结果在实际工程中的适用性,将 21609 工作面的地质参数作为样本,与实测底板破坏深度进行对比,结果见表 5。

表 5 初始经验公式与优化经验公式计算结果对比

Table 5 Comparison of calculation results between the initial empirical formula and the optimized empirical formula

区段	初始经验公式计算值/m	优化经验公式计算值/m	实测值/m	优化前相对误差/%	优化后相对误差/%
I 段	25.4	30.1	28.3	10.2	6.4
II 段	24.1	28.3	26.8	10.1	5.6
III 段	22.9	27.1	25.4	9.8	6.7

由表 5 可知,初始经验公式在三个区段的相对误差分别为 10.2%、10.1%和 9.8%,经 MSIDBO 优化后,相对误差分别降至 6.4%、5.6%和 6.7%,计算结果与实测值的吻合程度提高。对比结果表明,MSIDBO 优化能够有效修正初始经验公式的计算偏差,提高底板破坏深度计算精度。因此,本研究通过 MSIDBO 优化后的经验公式具有更高的精度,并表现出较好的泛化能力及工程适用性,可为深部采煤工程中的灾害防治与安全开采提供技术支撑。

4 讨论

本研究基于正交数值模拟结果建立底板破坏深度初始经验公式,并采用 MSIDBO 对经验公式修正系数进行优化,实现了对煤层底板破坏深度的定量计算。与传统经验公式相比,该方法能够在保留主要影响因素基础上提高计算效率与精度,并具有较明确的工程含义和可解释性。尽管本研究主要聚焦于滨湖煤矿 21609 超宽对拉工作面,但所选的采深、采高、切顶高度、煤层倾角等 8 个关键影响因素,均具有明确的岩体力学与水文地质意义,确保了优化公式的广泛适用性。因此,本研究提出的通过 MSIDBO 对经验公式进行优化的思路并不局限于单一工作面,对底板破坏受到采动强度、空间几何参数及顶底板岩性结构共同控制的类似工作面也具有一定参考价值。

未来在不同矿区推广应用时,应结合具体地质条件对经验公式参数和适用范围进行校核。对于断层、陷落柱、岩溶裂隙及强富水异常发育的矿区,仅依靠现有 8 个因素可能不足以全面反映底板破坏规律。后续研究可进一步引入断层落差、构造应力集中程度、底板含水层水压、隔水层厚度和岩溶裂隙发育程度等指标,并结合更多矿区实测样本对经验公式进行修正与检验,以提高其在复杂水文地质条件下的适用性。

5 结论

本研究采用 MSIDBO 对经验公式修正系数进行优化,得到优化后的底板破坏深度经验公式,有效改善了传统经验公式参数的确定依赖经验以及复杂工况下计算偏差较大的问题。结合工作面斜长变化特征,将 21609 对拉工作面划分为 I 段宽面区、II 段过渡区和 III 段窄面区,并以工作面斜长、采深、顶底板岩性组合和煤层倾角为固定工况参数,以采高、错距和切顶高度为工程可控变量进行寻优,得到各区段工程合理参数组合。微震-电法联合监测结果显示, I、II、III 段实测底板破坏深度分别为 28.3、26.8 和 25.4 m;优化经验公式计算值分别为 30.1、28.3 和 27.1 m,相对误差分别为 6.4%、5.6%和 6.7%,较初始经验公式误差明显降低,表明该方法在复杂地质条件下具有较好的可靠性与工程适用性。后续研究可进一步扩充不同矿区及赋存条件下的底板破坏样本,引入更多水文地质与构造因素,以强化公式在复杂地质环境下的迁移能力,为矿井水害智能预警提供更有效的技术支持。

参考文献:

- [1] 陈绍杰,刘瑞,徐贞社,等.不同覆岩地层正断层下盘煤层开采地表下沉规律[J].山东科技大学学报(自然科学版),2023,42(1):38-48.
CHEN Shaojie,LIU Rui,XU Zhenshe,et al. Surface subsidence laws of footwall coal seam mining of normal fault under different overburden strata[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science),2023,42(1):38-48.
- [2] 刘杰,陈志峰,高红星,等.滕县煤田下组煤地应力特征与灰岩夹层顶板稳定性控制研究[J].山东科技大学学报(自然科学版),2024,43(6):10-23.
LIU Jie,CHEN Zhifeng,GAO Hongxing,et al. Research on ground stress characteristics of lower formation coal in Tengxian coalfield and stability control of limestone interlayer roof[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science),2024,43(6):10-23.
- [3] DONG F Y,YIN H Y,CHEN S J,et al. Innovative groundwater disaster prevention and control systems for ultrawide working face mining in deeply buried confined aquifers[J/OL]. Journal of Hydrology,2025. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2025. 134244.
- [4] 尹会永,孙德辉,董方营,等.华北型煤田封闭采区地下水回升渗流特征与水质演化规律[J].煤田地质与勘探,2025,53(7):177-190.
YIN Huiyong,SUN Dehui,DONG Fangying,et al. Groundwater rebound and seepage characteristics and water quality evolution in a sealed mining area in North China type coalfield[J]. Coal Geology and Exploration,2025,53(7):177-190.
- [5] 曹东京,夏鸣泽,解树亮,等.基于 PFC-CFD 的采空区自燃“三带”预测[J].山东科技大学学报(自然科学版),2024,43(4):33-44.
CAO Dongjing,XIA Mingze,XIE Shuliang,et al. Prediction of spontaneous combustion “three zones” in goaf based on PFC-CFD[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology(Natural Science),2024,43(4):33-44.
- [6] 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):83-88.
HUANG Hui,SONG Xidong,HU Xiaolong,et al. Research on spatial failure characteristics of mining floor in gently inclined coal seams of underground coal mining and its application[J]. Mining Safety and Environmental Protection,2024,51(5):83-88.
- [7] 李建林,王雄雄,王燕,等.基于脆弱性指数法的煤层底板破坏深度预测[J].河南理工大学学报(自然科学版),2022,41(5):1-7.
LI Jianlin,WANG Xiongiong,WANG Yan,et al. Prediction of coal seam floor damage depth based on vulnerability index method[J]. Journal of Henan Polytechnic University(Natural Science),2022,41(5):1-7.
- [8] 李昂,王伟东,牟谦,等.多层结构底板破坏深度精确预测与 Matlab 实现[J].煤炭科学技术,2025,53(1):261-274.

- LI Ang, WANG Weidong, MOU Qian, et al. Accurate prediction of damage depth of multi-story structural footings with Matlab implementation[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(1): 261-274.
- [9] 邱梅, 赵建飞, 邵振东, 等. 基于组合赋权法和脆弱性指数模型的煤层底板突水危险性评价[J]. 煤炭工程, 2025, 57(1): 160-168.
- QIU Mei, ZHAO Jianfei, SHAO Zhendong, et al. Risk assessment of water inrush from coal seam floor based on combination weighting method and vulnerability index model[J]. Coal Engineering, 2025, 57(1): 160-168.
- [10] 李刚, 赵艺鸣, 杨庆贺, 等. 基于 SA-PSO-BP 神经网络的煤层底板破坏深度预测[J]. 地下空间与工程学报, 2025, 21(1): 293-299.
- LI Gang, ZHAO Yiming, YANG Qinghe, et al. Failure depth prediction of coal seam floor based on SA-PSO-BP neural network[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2025, 21(1): 293-299.
- [11] 施龙青, 张荣逊, 韩进, 等. 基于 GWO 改进的 PCA-BP 神经网络煤层底板破坏深度预测模型[J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(2): 88-93.
- SHI Longqing, ZHANG Rongao, HAN Jin, et al. Prediction model of failure depth of coal seam floor based on PCA-BP neural network improved by GWO[J]. Mining Research and Development, 2020, 40(2): 88-93.
- [12] GAO W F, HAN J. Prediction of destroyed floor depth based on principal component analysis(PCA)-Genetic Algorithm (GA)-Support Vector Regression(SVR)[J]. Geotechnical Geological Engineering, 2020, 38: 3481-3491.
- [13] XUE J K, SHEN B. Dung beetle optimizer: A new meta-heuristic algorithm for global optimization[J/OL]. The Journal of Supercomputing, 2022. DOI: 10. 1007/s11227-022-04959-6.
- [14] ABDEL-SALAM M, OLIVA D, PÉREZ-CISNEROS M, et al. Advanced feature selection approach with Halton-based enhanced adaptive dung beetle algorithm[J/OL]. Cluster Computing, 2025, 28. DOI: 10. 1007/s10586-025-05228-W.
- [15] TAN Y C, LIU S, ZHANG L Y, et al. The application of an improved LESS dung beetle optimization in the intelligent topological reconfiguration of shipPower systems[J/OL]. Journal of Marine Science and Engineering, 2024, 12. DOI: 10. 3390/JMSE12101843.
- [16] LI Y J, YIN H Y, ZHUANG N, et al. AI-enhanced geomechanical modeling: A dynamic mining land subsidence prediction framework with geology-triggered rebalancing[J/OL]. Process Safety and Environmental Protection, 2026, 211. DOI: 10. 1016/J. PSEP. 2026. 108791.
- [17] LÜ W, HE Y S, YANG Y K, et al. Improving the dung beetle optimizer with multiple strategies: An application to complex engineering problems[J/OL]. Biomimetics, 2025, 10. DOI: 10. 3390/BIOMIMETICS10110717.
- [18] 金明方, 李度周, 王冕, 等. 不稳定煤层多场联合勘探综合解译技术研究与应用: 以河南新义煤矿为例[J]. 地质与勘探, 2024, 60(5): 993-1001.
- JIN Mingfang, LI Duzhou, WANG Mian, et al. Research and application of comprehensive interpretation technology for multi-field joint exploration of unstable coal seams: A case study of the Xinyi coal mine in Henan Province[J]. Geology and Exploration, 2024, 60(5): 993-1001.
- [19] 陈强林, 李怀远, 吴文贤, 等. 综合电(磁)法在内蒙古希热哈达勘查区金多金属矿勘查的应用[J]. 中国地质调查, 2025, 12(3): 37-44.
- CHEN Qianglin, LI Huaiyuan, WU Wenxian, et al. Application of comprehensive electric(magnetic) method in the exploration of gold polymetallic deposits in Xirehada exploration area of Inner Mongolia[J]. Geological Survey of China, 2025, 12(3): 37-44.

(责任编辑: 高丽华)