

群采空区对主平巷的影响分析及采空区治理方案

欧志成¹, 彭跃金^{2,3*}, 杨宁^{2,3}, 欧任泽^{2,3}, 王辉林¹

(1. 西部矿业股份有限公司; 2. 长沙矿山研究院有限责任公司; 3. 国家金属采矿工程技术研究中心)

摘要: 为了解某地下矿山群采空区的存在对二、三中段主平巷的稳定性影响, 采用3Dmine软件建模, 统计分析采空区现状, 并由此建立三维数值模型进行相关计算, 分别从群采空区对主平巷的最大、最小主应力, 位移及塑性区进行分析。分析结果表明: 最大拉应力分别约为0.85 MPa和1.34 MPa, 绝大部分区域的沉降位移小于2.0 cm, 塑性区呈零星分布, 无贯通现象及趋势, 发生大范围塑性破坏的可能性较小。根据采空区大小、形态及矿山后续实际回采方案, 提出采用崩落法及钢筋混凝土全封闭阻波墙等手段处理采空区, 同时建议矿山根据实际情况对应力集中区域进行补强支护, 以确保主平巷及回采安全。

关键词: 群采空区; 数值模拟; 稳定性分析; 采空区治理; 3D建模; 崩落法; 应力集中; 补强支护

中图分类号: TD325

文献标志码: A

文章编号: 1001-1277(2025)04-0008-05

doi: 10.11792/hj20250402

引言

地下资源作为国民经济的重要支撑, 经过长期的开采, 地下矿山不免出现大量的采空区。由于采动影响, 采空区可能发生或大或小的崩塌, 逐渐形成采空区群, 对地表、井下巷道及井下回采造成重大的安全隐患。国家及企业逐渐重视并开始治理井下采空区^[1-7], 相关学者也针对井下采空区治理进行了研究。余正方等^[8-11]采用数值模拟、精细探测等手段对矿山井下群采空区进行精准探测及稳定性分析, 了解采空区可能发生的顶板冒落及围岩片帮机理, 为后续采空区处理奠定基础; 刘强等^[12-16]通过先进的监测手段对围岩应力变化进行监测, 并发现应力变化可分为递变式、突跳式、振荡式和复合式变化4种模式, 由此建立围岩应力变化的数学模型, 为实现井下应力变化实时预警提供参考; 赵东等^[17-21]对近采空区的巷道稳定性进行分析, 并提出了崩落及封闭隔离等采空区治理方案。

某矿山前期受民采破坏严重, 遗留大量形状不规则、大小不一的采空区, 为研究群采空区对正常回采主平巷稳定性的影响, 开展了采空区调查研究, 并分析了群采空区对主平巷稳定性的影响, 为该矿山处理采空区及主平巷应力集中区提供数据支撑。

1 工程概况

该矿山是一座露天转地下开采的矿山, 采用竖井

开拓方式。矿体平均厚度约22 m, 走向长约1 km, 平均倾角61°, 矿床地质条件较复杂, 矿体受层位控制, 铁、铜、铅、锌等矿体对岩性具有明显的选择性, 不同矿种的矿体赋存于不同的岩层中。由于前期受民采破坏, 井下条件极为复杂, 形成了诸多大小不一、形状不规则的采空区。受井下采动影响, 采空区的长期存在对于安全生产是重大隐患, 因此有必要对井下采空区的形态及现状进行详细调查。根据矿山实际勘查情况, 民采回采已涉及二中段及三中段2个中段。矿山对大小、形态各异的采空区进行了分析扫描, 并采用3Dmine等工程软件对采空区进行了三维数字建模统计。根据统计结果, 累计形成采空区总体积为95 951 m³, 如表1所示。

由表1可知: 301, 201, 202, 203共计4个采空区的体积约占总采空区体积68.99%, 二中段采空区体积约占总采空区体积66.05%。虽然目前采空区的体积较小, 但是随着时间的推移, 有可能发生变化, 因此必须进行有效的治理和管控, 预防因采空区造成的安全事故。

2 群采空区对中段平巷稳定性影响分析

2.1 计算模型建立

根据矿山生产现状及采空区实际测量情况, 采用Flac^{3D}软件建立计算模型。为了保证模拟计算的快速、准确, 选择水平走向为 x 方向, 垂直走向为 y 方向,

收稿日期: 2024-10-23; 修回日期: 2024-11-30

基金项目: “十四五”国家重点研发计划项目(2022YFC2905102)

作者简介: 欧志成(1982—), 男, 高级工程师, 从事矿山管理及采矿技术研究工作; E-mail: 307446504@qq.com

*通信作者: 彭跃金(1993—), 男, 工程师, 硕士, 从事矿山采矿技术研究工作; E-mail: 1820943728@qq.com

表 1 按采场统计的采空区分布情况
Table 1 Distribution of goafs by stope statistics

序号	采空区名称	采空区跨度/m	采空区长度/m	采空区高度/m	采空区面积/m ²	采空区体积/m ³	备注
1	201	22.44	28.25	45	521	23 445	二中段
2	202	15.56	25.45	45	361	16 245	
3	203	15.24	27.35	37	381	14 097	
4	204	18.41	15.84	37	259	9 583	
5	301	20.19	56.11	12	1 034	12 408	三中段
6	302	23.00	28.86	7	569	3 983	
7	303	18.34	61.05	8	881	7 048	
8	304	17.38	34.43	7	541	3 787	
9	305	20.92	37.27	9	595	5 355	
合计					95 951		

竖直向上为 z 方向,按照 1:1 的比例建立模型,形成了尺寸为 1 500 m×1 400 m×1 000 m 的计算模型(如图 1 所示),共划分 312 865 个网格节点,1 835 984 个四面体网格单元。根据矿山现有数据,选用如表 2 所示的力学参数进行模拟计算。

表 2 岩体力学参数(自然状态)
Table 2 Mechanical parameters of rock mass (natural state)

岩体	密度/(g·cm ⁻³)	内聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	弹性模量/MPa	泊松比
透闪岩	3.5	1.2	30	5.5	0.55	3 371.49	0.24
石英岩	3.03	2	35	16.5	5	14 228.24	0.21
千枚岩	2.95	1.3	33	7.5	2.5	9 836.96	0.24
云母石英片岩	2.8	1.6	32	12.2	3.1	10 454.11	0.23
板岩	2.7	0.6	25	2.8	0.4	2 881	0.25
砂岩	3	0.2	22			3 400	0.26
绿泥片岩	3	0.32	28			3 000	0.23
覆盖层	2.2	0.1	39			750	0.29
混凝土	2.36	3.18	54.9			3 000	0.26

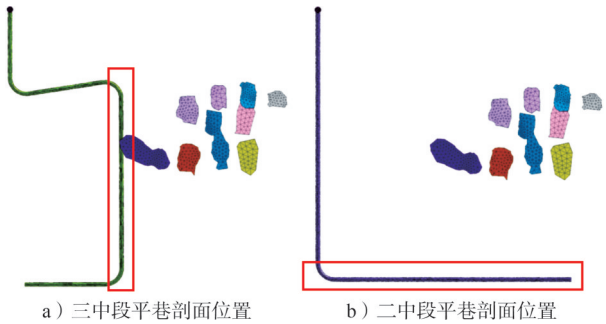


图 2 中段平巷 x 方向剖面位置

Fig. 2 Cross-sectional position of the level drift in the x -direction

2.2.1 主应力分析

根据模拟计算结果,得到了二中段及三中段平巷在 z 方向的最大主应力和 x 方向的最大主应力,模拟结果如图 3、图 4 所示。

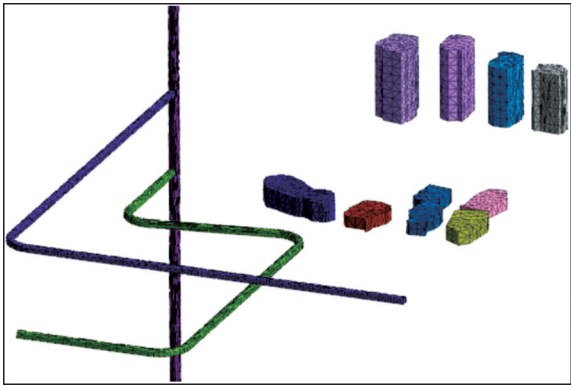


图 1 采空区三维数值计算模型

Fig. 1 3D numerical calculation model of goafs

2.2 中段平巷稳定性分析

考虑到群采空区离中段平巷的位置较近,为更清晰地了解群采空区对中段平巷稳定性的影响,在整体模型的基础上将 z 方向和 x 方向剖切,进行中段平巷稳定性数值模拟分析。其中, z 方向剖面可以剖切平巷全貌, x 方向的剖面位置为离采空区较近的一段平巷,剖面位置如图 2 所示。

由图 3 和图 4 可知:二中段及三中段平巷主应力分布较为均匀,各区段的主应力大小差别不大,仅在巷道转弯处存在较为明显的应力差异,说明在转弯处出现了较明显的应力集中;但二中段及三中段平巷最大拉应力分别约为 0.85 MPa 和 1.34 MPa,均小于矿(岩)体及混凝土的抗拉强度,说明二中段及三中段平巷发生拉破坏的可能性较小;同时也说明主平巷的支护措施完全满足各项任务需要。

2.2.2 位移分析

根据前述应力云图分析结果,主平巷各个位置的沉降或位移应该均较小,巷道破坏的可能性较小。二中段及三中段在 x 、 y 、 z 方向的位移云图如图 5 所示。

由图 5 可知:中段平巷水平方向总体位移不大,分布较为均匀; z 方向位移总体较小,绝大部分区域的

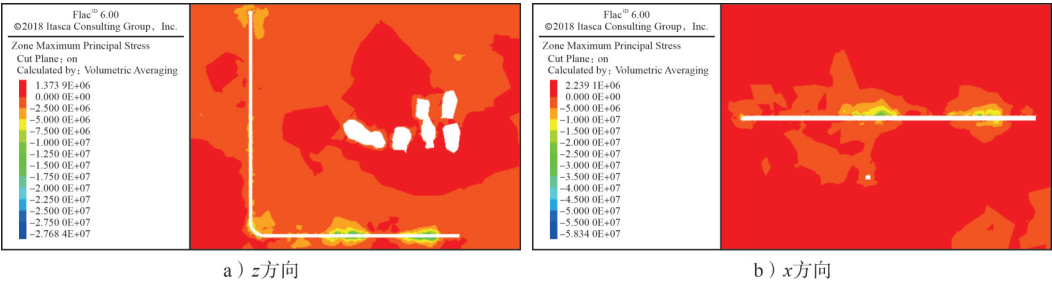


图3 二中段平巷主应力分布云图

Fig. 3 Cloud chart of principal stress distribution of the Level 2 drift

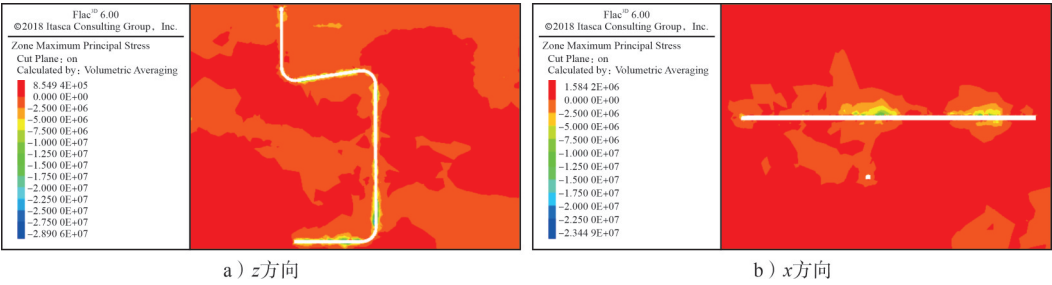


图4 三中段平巷主应力分布云图

Fig. 4 Cloud chart of principal stress distribution of the Level 3 drift

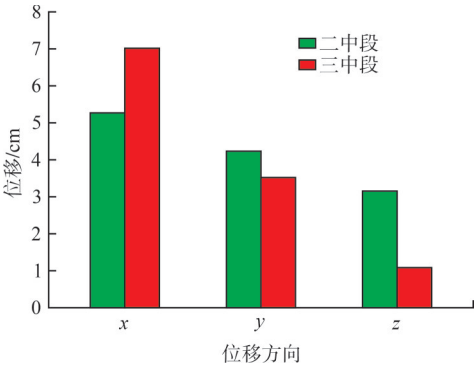


图5 中段平巷位移分布

Fig. 5 Displacement distribution of the level drift

沉降位移小于2.0 cm,三中段、二中段平巷最大沉降位移分别为1.06 cm、3.14 cm,分布于巷道中间段。三中段平巷 x 方向最大位移为7.01 cm, y 方向最大位移为3.51 cm;二中段平巷 x 方向最大位移为5.27 cm, y 方向最大位移为4.22 cm。

2. 2. 3 塑性区分析

二中段及三中段在 x 方向及 z 方向的塑性区云图如图6所示。

根据模拟结果,模型内出现了 shear-n、shear-p、tension-p 不同状态及复合状态的塑性区,但绝大部分为过去时步的塑性区,离采空区更近的部分巷道存在

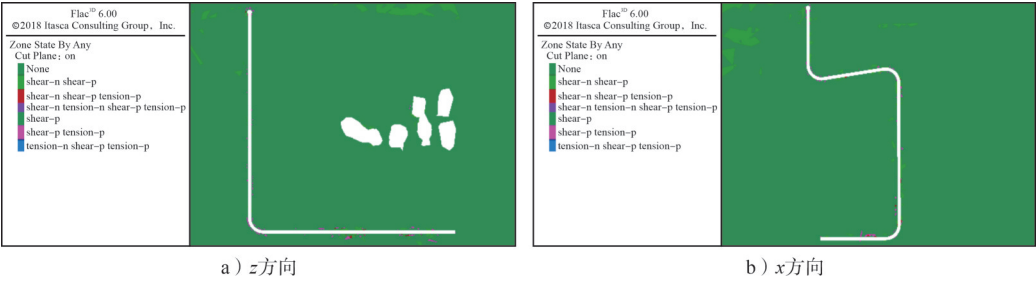


图6 中段平巷塑性区分布云图

Fig. 6 Cloud chart of plastic zone distribution of the level drift

少量当前时步的塑性区,但呈零星分布,未连接成片,无贯通现象及趋势,可以认为,中段平巷发生大面积塑性破坏的可能性较小。

综上所述,结合主应力、位移、塑性区分析结果,二中段及三中段平巷最大拉应力分别约为0.85 MPa和1.34 MPa,二中段及三中段平巷发生拉破坏的可能性较小。中段平巷水平方向总体位移不大,分布较为

均匀; z 方向位移总体较小,绝大部分区域的沉降位移小于2.0 cm。中段平巷顶板及两帮塑性区较少,呈零星分布,未连接成片,无贯通现象及趋势,发生大范围塑性破坏的可能性较小。因此可以认为,中段平巷较为稳定,由于应力的集中和传递,巷道转弯处和距离采空区更近的部分存在一定的塑性破坏可能,需在此处补强支护。

3 采空区治理

3.1 二中段采空区

3.1.1 采空区概况

二中段采空区形成时间较长,矿(岩)体较为稳固,因此前期并未采取相应处理措施,但局部暴露面积较大的区域由于地应力分布及形成时间较久等缘故,出现局部冒落。目前,采空区的现状调查情况如表3所示,结合表1可以看出,二中段采空区虽然暴露面积小,但回采高度较高,整体稳定性欠佳,该区域群采空区稳定性系数并不是很高,个别采空区趋于稳定。

表 3 二中段采空区赋存情况

Table 3 Occurrence status of goafs in Level 2

序号	采空区名称	采空区安全等级	处理方式	中段入口处理方式
1	201	Ⅳ	已放顶处理	铁栅栏/设禁止入内标志
2	202	Ⅲ	已放顶处理	铁栅栏/设禁止入内标志
3	203	Ⅲ	暂未处理	铁栅栏/设禁止入内标志
4	204	Ⅱ	暂未处理	铁栅栏/设禁止入内标志

3.1.2 采空区治理方案

现存采空区体积约63 370 m³,整体采空区的体积均较大,其中,201采空区、202采空区、203采空区的体积分别为23 445 m³、16 245 m³及14 097 m³,存在冒落风险。为避免较大冲击波,故将201采空区、202采空区、203采空区采用崩落法进行处理;204采空区的暴露面积和体积均最小,体积不超过10 000 m³,因此采用钢筋混凝土全封闭阻波墙处理(如图7所示),工程量为200 m³。阻波墙墙体采用C20混凝土现浇。浇筑时注意接顶,不留空隙。钢筋主筋为φ16~18 mm螺纹钢,间距400 mm,副筋为φ6~8 mm圆钢,间距600 mm。岩石阻波墙采用浅孔或深孔将巷道或其他通道两帮和顶板围岩剥落,填满接顶。填满接顶长度10~15 m。岩石不多时,以砂石补充。

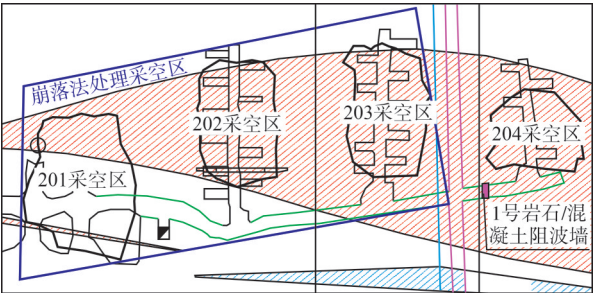


图 7 二中段采空区治理方案示意图

Fig. 7 Diagram of the treatment plan for goafs in Level 2

3.2 三中段采空区

3.2.1 采空区概况

三中段采空区形成时间较长,矿(岩)体较为稳固,因此前期并未采取相应处理措施,但局部暴露面积较大的区域(如301采空区)由于地应力分布及形成时间较久等缘故,出现局部冒落。目前,采空区的现状如表4所示,结合表1可以看出,个别采空区存在较大面积空区,但整体的回采高度不高,且该区域采空区的整体稳定性较好,属于较稳定、局部区域不稳定的采空区类型。

表 4 三中段采空区赋存情况

Table 4 Occurrence status of goafs in Level 3

序号	采空区名称	采空区安全等级	处理方式	中段入口处理方式
1	301	Ⅳ	暂未处理	铁栅栏/设禁止入内标志
2	302	Ⅱ	暂未处理	铁栅栏/设禁止入内标志
3	303	Ⅲ	暂未处理	铁栅栏/设禁止入内标志
4	304	Ⅱ	暂未处理	铁栅栏/设禁止入内标志
5	305	Ⅱ	暂未处理	铁栅栏/设禁止入内标志

3.2.2 采空区治理方案

现存采空区体积约32 581 m³,301采空区和303采空区的空场面积较大,可能会发生冒顶现象,特别是301采空区的体积达到12 408 m³,该采空区位于最西侧,相对另外4个采空区位置较为独立。为避免较大冲击波且考虑到矿山后续将使用无底柱分段崩落采矿法开采,在顶部形成覆盖层是使用该方法采矿的先决条件,因此提前采用崩落法处理三中段的采空区,如图8所示。

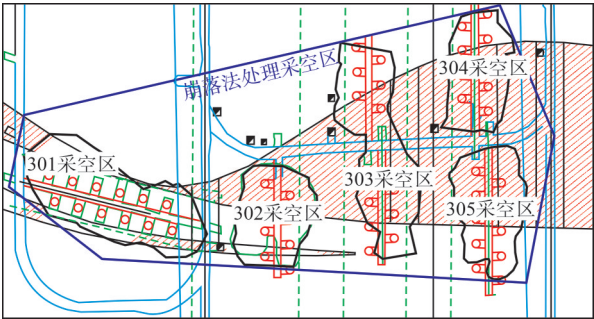


图 8 三中段采空区治理方案示意图

Fig. 8 Diagram of the treatment plan for goafs in Level 3

4 结 论

1)结合二中段及三中段群采空区对主平巷的应力、位移及塑性区的分析结果,最大拉应力分别约为0.85 MPa和1.34 MPa,绝大部分区域的沉降位移小于

2.0 cm,塑性区呈零星分布,无贯通现象及趋势,发生大范围塑性破坏的可能性较小。

2)研究了二中段和三中段的采空区治理方案,根据采空区大小、形态及矿山后续实际回采方案,提出采用崩落法及钢筋混凝土全封闭阻波墙手段,按先上后下、由高到低依次进行,逐步缓解采空区安全隐患。

3)建议矿山对主平巷转弯处等应力集中的地方进行补强支护,防止其发生塑性破坏。

[参考文献]

[1] 林开森,周健,李佳建.巷道与断层破碎带间距对岩体稳定性影响分析[J].黄金,2024,45(4):1-4.

[2] 何斌全,李仲泽,陈国辉,等.柿竹园多金属矿露天-地下协同开采安全稳定性分析[J].矿业研究与开发,2023,43(4):1-10.

[3] 时传龙.基于3Dmine的采空区治理工程实践[J].黄金,2024,45(10):68-71.

[4] 高天宇,马麟.锡铁山铅锌矿采空区治理方案优选[J].现代矿业,2021,37(9):80-83.

[5] 吴建兰.采空区巷道围岩应力分布及稳定性分析[J].江西煤炭科技,2021(3):4-6.

[6] 杨括宇,陈从新,夏开宗,等.崩落法开采金属矿巷道围岩破坏机制的断层效应[J].岩土力学,2020,41(增刊1):279-289.

[7] 陈志强,王红心.基于组合赋权和未确知测度理论的采空区安全性评价[J].黄金,2023,44(2):27-30,37.

[8] 余正方,胡远,张玮,等.大红山铁矿Ⅱ-1头部采空区精细探测与稳定性分析[J].现代矿业,2021,37(4):189-192.

[9] 龙斌,徐超,戴军,等.基于FLAC^{3D}某铁矿采空区稳定性数值模拟研究[J].现代矿业,2023,39(9):91-94,98.

[10] 姜立春,贾晓川.采空区群的亚稳定“短板”单元甄别[J].地下空间与工程学报,2017,13(增刊1):344-348.

[11] 王伟.基于Flac^{3D}的复杂采空区稳定性分析[J].黄金,2021,42(6):41-46.

[12] 刘强,赵冉,王平,等.基于微震监测技术的采空区周边巷道稳定性研究[J].有色金属(矿山部分),2019,71(5):24-27,46.

[13] 李长生,王军,刘景军.围岩应力-水压-水温多功能监测仪研发与应用[J].黄金,2023,44(8):44-47.

[14] 张磊,寇建恒,窦梅林,等.采空区影响条件下巷道围岩应力监测与研究[J].中国安全生产科学技术,2015,11(8):33-39.

[15] 李威,戚伟,吴星辉.基于钻孔应力监测的深部开采围岩应力演化及数值模拟研究[J].黄金,2019,40(5):27-32.

[16] 张旭飞,郭运鸿,王兴亚,等.焦家金矿巷道掘进过程中围岩变形及应力分布演化规律[J].黄金,2024,45(6):1-5.

[17] 赵东,张永星,孙晓明.金属矿山地下采空区处理方案的优化研究[J].中国金属通报,2018(11):16-17.

[18] 贾海波,任凤玉,丁航行,等.某银多金属矿采空区综合治理方法[J].金属矿山,2018(2):41-45.

[19] 谭志宏,贾天让,韩正林,等.围岩均匀性对近采空区巷道稳定性影响的数值模拟研究[J].矿业安全与环保,2011,38(3):23-25.

[20] 吴英杰,赖伟.某铜矿尾矿处置及采空区充填协同治理实践[J].黄金,2021,42(10):79-82.

[21] 侯俊,程文文,闵忠鹏,等.基于未确知测度理论的采空区稳定性分级[J].黄金,2017,38(11):29-33,37.

Impact analysis of goaf groups on main drifts and goaf treatment solutions

Ou Zhicheng¹, Peng Yuejin^{2,3}, Yang Ning^{2,3}, Ou Renze^{2,3}, Wang Huilin¹

(1. West Mining Co., Ltd.;

2. Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd.; 3. National Engineering Research Center for Metal Mining)

Abstract: To investigate the stability impacts of existing goaf groups on the main drifts in Level 2 and Level 3 of an underground mine, this study utilized 3Dmine software modeling to statistically analyze the current state of goafs. A 3D numerical model was subsequently developed for computational simulations, focusing on the maximum/minimum principal stresses, displacement, and plastic zones induced by the goaf groups. Analysis results indicate that the maximum tensile stresses are approximately 0.85 MPa and 1.34 MPa, with settlement displacements in most areas below 2.0 cm. Plastic zones are sporadically distributed without connectivity or coalescence trends, suggesting a low probability of large-scale plastic failure. Based on goaf geometries and subsequent mining plans, treatment strategies such as caving methods and fully enclosed reinforced concrete wave-blocking walls are proposed. Additionally, reinforcement support measures for stress-concentrated zones are recommended to ensure the safety of main drifts and mining operations.

Keywords: goaf groups; numerical simulation; stability analysis; goaf treatment; 3D modeling; caving method; stress concentration; reinforcement support