

湖南郴州某矿复杂形状采空区群稳定性分析

李金诚¹, 李青锋^{1,2*}, 吴昊¹

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 湖南科技大学 矿业工程研究院, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 为研究湖南郴州某矿 1[#]~8[#] 采空区的稳定性, 通过室内试验获取岩石力学参数, 结合理论与数值模拟对其采空区围岩的位移、应力、塑性区进行分析。结果表明: 8 个采空区均有塑性屈服的单元, 只有 6[#] 和 7[#] 采空区附近围岩具有良好的稳定性, 1[#], 3[#], 4[#] 采空区塑性较为发育, 但对其矿区整体稳定性影响不大。在水平方向上, 2[#] 和 5[#] 采空区稳定性较好, 8[#] 采空区稳定性较差, 需要进行支护。垂直方向上, 2[#], 5[#], 8[#] 均出现较为严重的塑性区破坏且周围岩体位移相对明显, 需要对其进行支护。

关键词: 采空区群; 塑性区; 数值模拟; 围岩稳定性

中图分类号: TD353 文献标志码: A 文章编号: 1672-9102(2022)01-0001-07

Stability Analysis of Complex-Shaped Goaf Group in a Mine of Chenzhou, Hunan Province

LI Jincheng, LI Qingfeng, WU Hao

(1. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Institute of Mineral Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: In order to study the stability of 1[#]~8[#] goafs of a mine in Chenzhou, Hunan Province, this paper obtains the rock mechanical parameters through laboratory tests, and analyzes the displacement, stress and plastic zone of surrounding rock in the goafs by a combination of theoretical analysis and numerical simulation. The research results show that all the 8 goafs have plastic yielding units. Only the surrounding rocks near the 6[#] and 7[#] goafs have a good stability, and the 1[#], 3[#], and 4[#] goafs have relatively developed plasticity, which has little effect on the overall stability of the mining area. In the horizontal direction, the 2[#] and 5[#] goafs have a good stability, but the 8[#] goaf has a poorly horizontal stability and needs to be supported. In the vertical direction, the 2[#], 5[#], and 8[#] goafs all have seriously plastic zone failures and the surrounding rock mass displacement is relatively obvious, which needs to be supported.

Keywords: goaf group; plastic area; numerical simulation; surrounding rock stability

在矿山开采过程中, 地下空间将会形成连续或非连续的采空区。采空区的存在可能会导致相关地质灾害, 其稳定性对工程安全存在较大的影响, 采空区一旦失稳将会破坏底板及围岩的稳定性, 轻则造成财产损失, 重则危及人身安全^[1-3]。因此, 研究采空区稳定性具有重要意义。目前, 采空区稳定性分析方法有理论分析、数值模拟、现场测量、模糊评价等方法。Wang F F 等^[4]采用理论计算和现场调查 2 种方法对大桥磷矿采空区矿柱的稳定性进行研究, 结果表明矿柱埋深及分布密度等参数对采空区稳定性具有重要影响; Wang Y S 等^[5]通过多传感器建立实时在线监测预警系统, 达到对采空区进行连续监测的目的, 为采空区提供短期的稳定性预警信息; Yang H Q 等^[6]基于工程实践, 通过理论分析与数值模拟, 得出采动扰动下采

收稿日期: 2021-10-09

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目 (2018JJ2130)

* 通信作者, E-mail: lqf66@hnust.edu.cn

空区围岩关键层的破裂机理、应力分布及其围岩变形特征;滕永海等^[7]探讨了老采空区上方地基稳定性的评价方法,并考虑老采空区活化可能带来的地表残余变形,为老采空区上方兴建多层建筑提供科学依据;张耀平等^[8]采用 FLAC^{3D} 软件对龙桥铁矿采空区的稳定性进行数值模拟,通过分析其结果得出,采空区逐渐形成后各隅角处会先达到极限剪切破坏状态,随着采空区的进一步增大,其破坏区域将慢慢延伸并扩大;刘沐宇等^[9]基于现场工程地质调查,对矿区岩体质量进行分类,并估算出其岩体强度,再通过安全系数法和可靠度分析法得到矿柱的点安全系数与可靠指标,结果表明采空区矿柱处于安全稳定状态;刘光清等^[10]分析了采空区群的稳定性,并利用数值计算方法比较了不同残矿回采方案下的安全性,为矿山实践提供参考意义;龚甲桂等^[11]利用三维激光扫描方法测量采空区矿柱、顶板和采空区之间关系,从而分析得到采空区的稳定状态。

前人对采空区稳定性做了较多的分析^[12-13],但针对的均是形状较规则的矩形采空区群.本文针对湖南郴州某矿复杂形状 1#~8# 采空区群,运用理论分析与数值模拟相结合的方法,探讨采空区围岩应力和位移集中分布区域以及塑性损伤特征,为复杂采空区稳定性评估提供一定的理论依据。

1 矿山采空区现状

湖南郴州某矿为地下开采,斜坡道以螺旋式开拓.从实测可以看出,原矿山沿着斜坡道两边开采,使斜坡道及两边的采场一起形成了采空区.采空区表现为间断不连续,且跨度为 8~41 m,平均约 18 m;高度为 6.5~14.0 m,平均约 6.8 m.采空区顶板暴露面积合计达 1.56 万 m²,体积合计 11.3 万 m³.从采空区现场调查来看,矿体直接顶底板岩性主要为白云质灰岩、白云岩,其采空区形态及相互关系如图 1 所示。

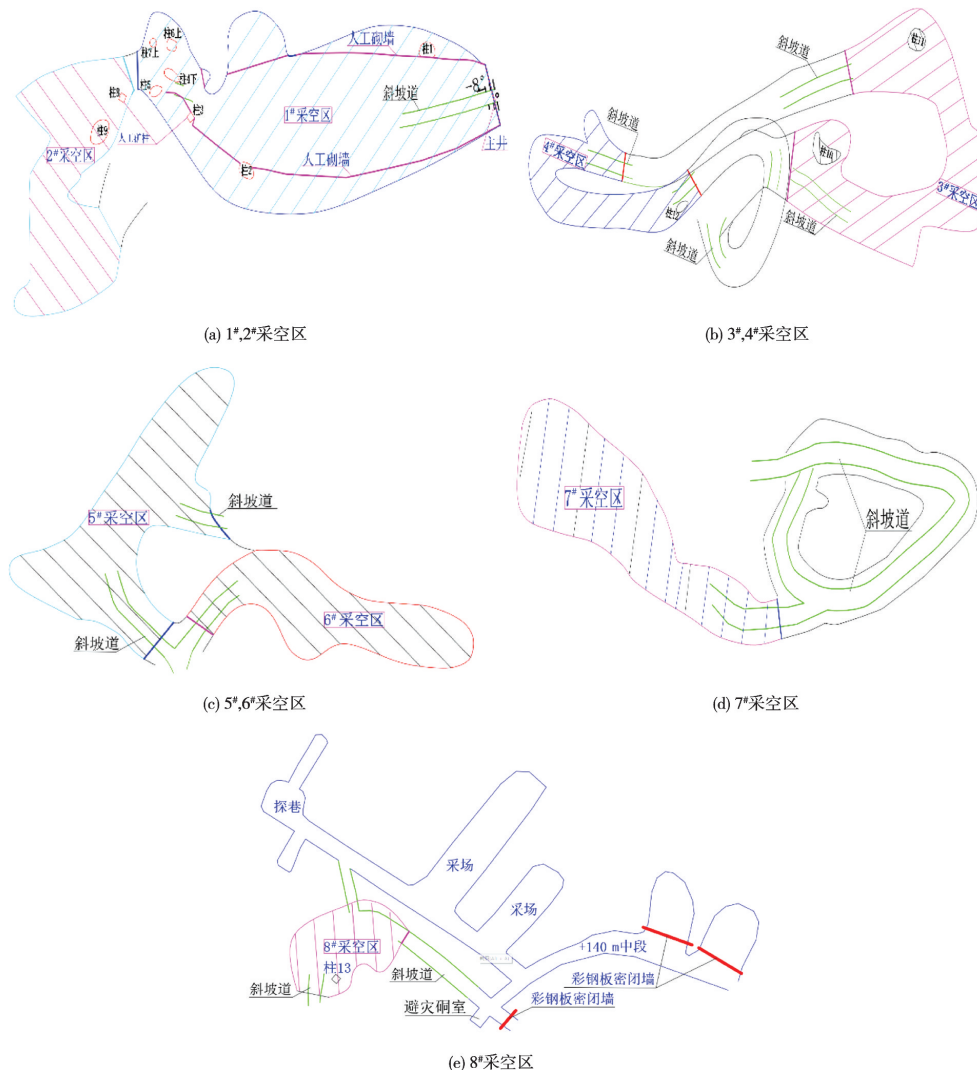


图 1 湖南郴州某矿 1#~8# 采空区形态及其关系

2 岩石力学参数获取及岩体力学参数转化

2.1 岩石力学参数获取

试验所用岩样取自湖南郴州某矿采空区顶板岩层,并严格按照地质矿产行业标准《岩石物理力学性质试验规程》(DZ/T0276.18—2015)进行切割.岩样试件如图2所示,试验所得的岩石力学参数如表1所示.



图2 岩样试件

表1 矿区岩石力学参数

岩性	单轴抗压强度/MPa		弹性模量/GPa	抗拉强度/MPa	泊松比	内聚力/MPa		内摩擦角/(°)	
	自然	饱水	自然	自然	自然	自然	饱水	自然	饱水
白云岩	170.16	134.84	26.29	8.11	0.25	42.34	23.89	28.69	29.96

2.1.1 抗压试验

使用液压力试验机对岩石抗压试件进行加载,让试件均匀受力的同时,控制其加载速度直至试件破坏.岩石的抗压强度计算公式为

$$R = \frac{P}{S} \quad (1)$$

式中: R 为单轴抗压强度,MPa; P 为试件破坏载荷,N; S 为试件横截面积, mm^2 .

2.1.2 抗拉试验

岩石的抗拉强度就是岩石试样在单向拉力作用下所能够抵抗破坏的极限能力,也被称为极限强度.本文通过劈裂法测定岩石的抗拉强度,具体计算公式为

$$R_L = \frac{20P}{\pi DL} \quad (2)$$

式中: R_L 为试件抗拉强度,MPa; D 为试件的高度,mm; L 为试件的厚度,mm.

2.1.3 抗剪试验

岩石的抗剪强度采用变角度剪切法,试件所受到的载荷可以分解成垂直和平行剪切方向的正压力和剪应力,采集自然状态和饱水状态下白云岩在3个角度(35° , 40° , 45°)的正应力和剪应力,并结合线性回归公式计算其内聚力 c 和内摩擦角 φ :

$$\sigma_\alpha = \frac{P \cos \alpha}{A}; \quad (3)$$

$$\tau_\alpha = \frac{P \sin \alpha}{A}; \quad (4)$$

$$\tau_\alpha = c + \sigma_\alpha \tan \varphi. \quad (5)$$

式中: σ_α 为垂直剪切方向的正压力,MPa; τ_α 为平行剪切方向的剪应力,MPa; α 为模具的倾角,(°); A 为试件受剪切面的面积, mm^2 , c 为内聚力,MPa; φ 为内摩擦角,(°).

2.2 岩体力学参数转化

由于岩体受到水、风化等外营力的作用,所以在将岩块力学参数应用于岩体工程时,必须考虑岩块与岩体之间的差异.利用室内试验资料,采用多种工程处理方法,得到符合实际工程的岩体力学参数,使分析结果更接近于现场实际情况.

2.2.1 岩体单轴抗压强度和单轴抗拉强度的估算

由 Hoek-Brown 准则^[14-16]进行变换得到岩体单轴抗压强度和单轴抗拉强度的计算公式:

$$\sigma_{mc} = \sqrt{s} \sigma_c; \quad (6)$$

$$\sigma_{mt} = \frac{1}{2} \sigma_c (m - \sqrt{m^2 + 4s}). \quad (7)$$

式中: σ_{mc} 为岩体单轴抗压强度; σ_{mt} 为岩体单轴抗拉强度; m, s 为无量纲实验常数.其中 m 的取值范围为 0.001~25,严重扰动岩石 m 取 0.001,坚硬完整岩石 m 取 25; s 的取值范围为 0~1,破碎岩石 s 取 0,完整岩石 s 取 1.

2.2.2 岩体弹性模量的折减与内摩擦角、内聚力的计算

对弹性模量采用经验公式进行折减^[17],而对内聚力和内摩擦角运用 Mohr-Coulomb 强度准则,计算公式为

$$E_m = \begin{cases} 10^{\frac{RMR-10}{40}}, & RMR < 50; \\ 2RMR - 100, & RMR \geq 50. \end{cases} \quad (8)$$

$$\varphi = \arctan \frac{\sigma_{mc} + \sigma_{mt}}{\sigma_{mc} - \sigma_{mt}}; \quad (9)$$

$$c = \sigma_{mt} \left(\tan \varphi + \frac{1}{\cos \varphi} \right). \quad (10)$$

式中: E_m 为岩体弹性模量;RMR(Rock mass rating)是岩体各项指标进行综合评价的具体值.

根据现场调查并对照 RMR 评分表计算,得出研究区域内岩体 RMR 评分值为 73,且矿区岩石比较致密和稳定,层理明显.故按照岩体自然状态进行分析,其折减后的岩体力学参数如表 2 所示.

表 2 折减后矿区岩体基本力学参数

岩性	自然抗压强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	自然抗拉强度/MPa	内聚力/MPa	内摩擦角/(°)
白云岩	37.63	46	0.25	0.79	8.029 5	7.94

3 采空区稳定性数值分析

3.1 模型建立

根据矿区地质和采空区资料,利用 FLAC^{3D}有限差分软件,建立整体模型.在 Auto-CAD 中完成实体模型的建立后,并使用 Rhino 6 对网格进行优化,删去重复和相交的线段,此后再利用 Rhino 6 中的插件 Griddle1.0 对模型的网格进行划分,并导入 FLAC^{3D}得到模型,如图 3 所示.模型长 350 m,宽 266 m,左侧高 214 m,右侧高 140 m,整个模型一共划分成 1 268 120 个网格,864 409 个节点.在 FLAC^{3D}中对模型采用位移边界条件:四周和底面固定,顶部为自由面.为得出自然状态下采空区群的稳定性,模型只考虑承受重力加速度.模型计算时,围岩体本构模型选用 Mohr-Coulomb 模型,岩体力学参数采用表 2 中的数据.

3.2 采空区整体稳定性结果分析

采空区整体位移云图如图 4 所示.从图 4 中可以看出:由于采空区的开挖和相互贯通,使围岩的移动范围扩大,地表岩体也受到一定程度的影响.在采空区较为集中的部位,地表呈现出一定程度的位移;在采空区叠加和高度贯通的区域,其上方岩体移动明显,位移最大值接近 3.16 cm.此种程度下需要在位移最大

值的下方采空区采取一定的控制措施,确保地表不出现裂缝或坍塌.

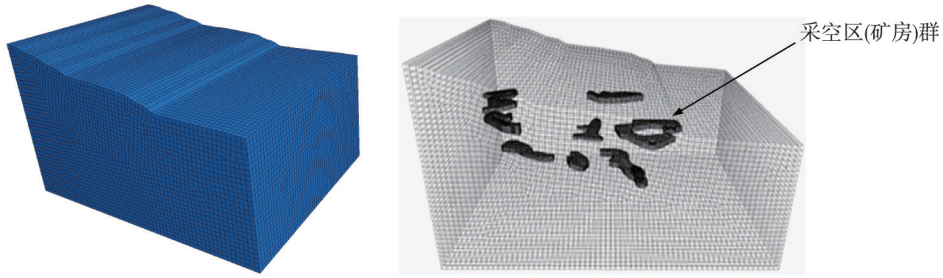


图 3 围岩采空区群模型

垂直方向截取采空区的塑性区分布及位移云图如图 5 所示.采空区的存在会导致应力集中,且在一定程度上应力集中会进一步加大,此时顶板将承受更大的载荷而发生屈服.图 5 显示大部分采空区围岩均发生破坏,且主要破坏发生在采空区的顶板,这表明实际工程中可能会出现顶板岩石剥落的现象,存在一定的隐患;除此之外,采空区周围的岩壁也发生明显的破坏,这表明实际工程中所对应的是采空区侧墙的岩石脱落.

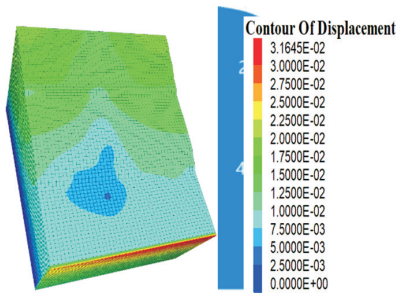


图 4 模型整体位移云图

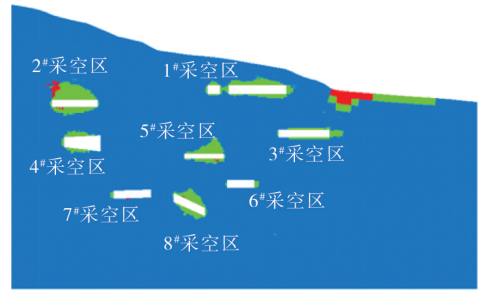


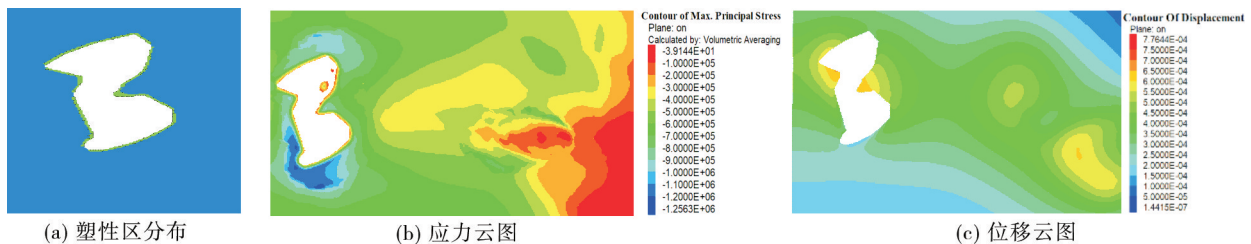
图 5 矿柱及采空区内部塑性区分布

从图 5 中采空区内部塑性区分布可以看出:8 个采空区由于形状、尺寸和埋藏深度的不同,在自然条件下均有不同程度的塑性屈服单元.从采空区塑性区发育情况可以看出:只有 6#和 7#采空区附近的围岩具有良好的稳定性;1#,3#,4#采空区塑性较为发育,但对整体的影响不大;2#,5#,8#采空区塑性破坏都较为严重,其中 2#采空区破坏程度最大.在垂直方向上,8#采空区的塑性破坏与 2#,5#差别不大,但在水平方向上却有所区别,所以接下来对 2#采空区水平和垂直方向的围岩稳定性以及 8#采空区水平方向上的围岩稳定性进行重点分析.

3.3 2#和 8#采空区稳定性分析

3.3.1 2#采空区水平方向和垂直方向剖面分析

2#采空区在水平方向上的塑性区分布、位移与应力云图如图 6 所示.从图 6a 中看出:剖面内塑性区得到了一定程度的发育,整个采空区周围岩体中均有分布,表明周围岩体都有一定程度上的破坏.从应力云图来看,在采空区开挖后,2#采空区的一侧岩体虽然出现明显的应力集中现象,且该处的应力较大,但从位移云图来看,2#采空区周围岩体位移相对较小,因此 2#采空区水平方向是比较稳定的.



(a) 塑性区分布

(b) 应力云图

(c) 位移云图

图 6 2#采空区水平方向剖面

在垂直方向上,2#采空区的塑性区分布、位移与应力云图如图 7 所示.从图 7a 可以看出:开挖之后采

空区的顶板和底板塑性区发育,形成较大的塑性破坏,在图 7b 和图 7c 中也能明显看出.由于应力集中现象,采空区顶板位置的位移达到 2 cm,岩体位移相对明显,较硬岩体在未支护的情况下会发生变形,使得岩块局部脱落,因此需要对顶板进行支护.

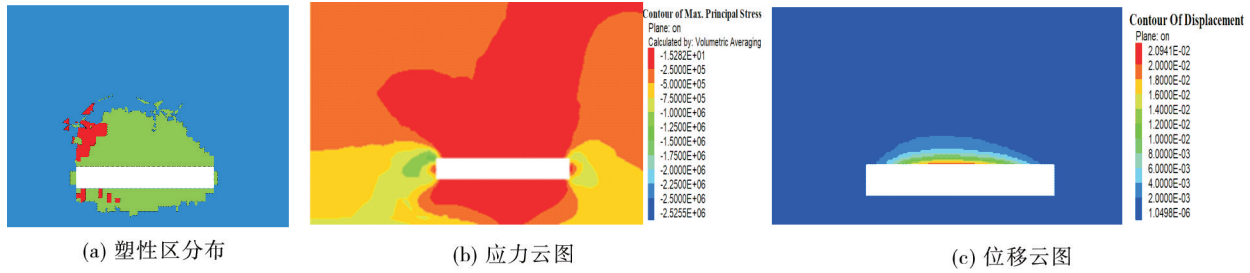


图 7 2#采空区垂直方向剖面

3.3.2 8#采空区水平方向剖面分析

8#采空区在水平方向上的塑性区分布、位移与应力云图如图 8 所示.与 2#采空区塑性区相比,8#采空区塑性破坏范围较为严重,由于 2 个采空区相距较近,所以表现出采空区的“群效应”,周围围岩出现了应力叠加现象,使其中间也出现了一定程度上的塑性破坏.从位移云图分析可知,由于采空区周围岩体应力分布不均,8#采空区的右侧以及 2 个采空区中间出现较为明显的位移,且位移量远远大于 2#采空区水平方向上的位移.

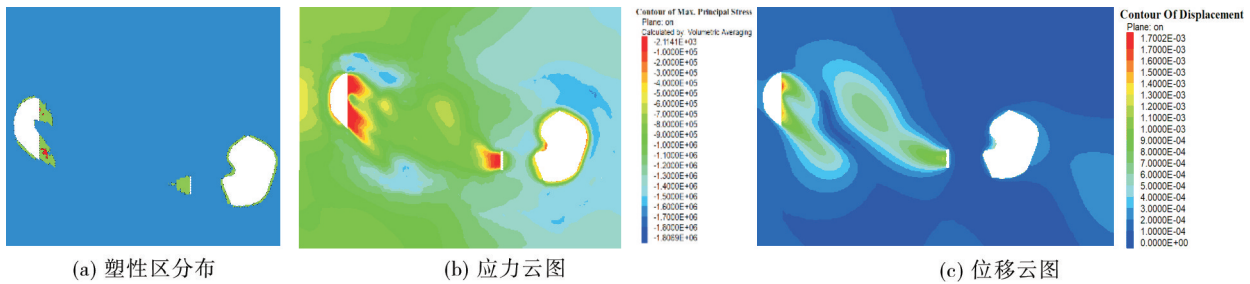


图 8 8#采空区水平方向剖面

从整体上看, 2#采空区埋藏最浅,其次是 5#采空区,8#采空区埋藏最深.随着深度的增加,围岩所受应力将增大,其塑性区面积也应逐渐增大,但从塑性区来看,埋藏较浅的 2#采空区塑性破坏却比 8#采空区更严重.通过对采空区现场实测,8#采空区空区高度约 9 m,平均跨度约 20 m,采空区面积只有 710 m²,但 2#采空区空区高度约 6.8 m,平均跨度约 24 m,采空区面积却达 1 300 m².由此来看,采空区的深度、顶板跨度、暴露面积等参数对其塑性区都有很大的影响.

4 治理效果

经前文分析,湖南郴州某矿 6#和 7#采空区附近的围岩具有良好的稳定性,1#、3#、4#采空区塑性较为发育,但对整体的影响不大.2#、5#、8#采空区塑性破坏较为严重,故针对该矿 2#、5#、8#采空区采用人工矿柱的方法支撑顶板,缓解岩体应力集中的程度,转移应力集中的部位,使应力达到新的相对平衡,从而保证矿山安全生产的目的.支护情况如图 9 所示.

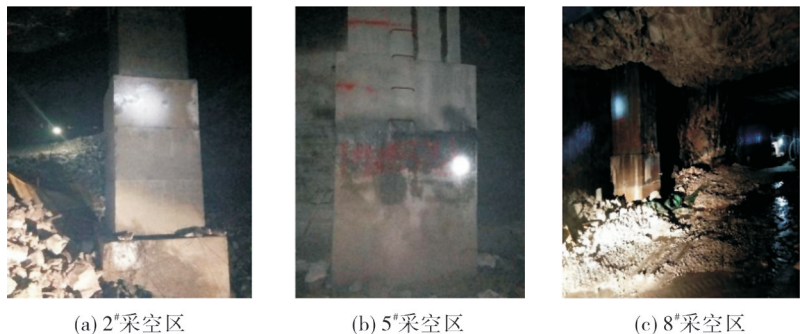


图 9 采空区支护情况

5 结论

1)采空区深度、顶板跨度和暴露面积决定着采空区塑性区的发育.采空区的深度越深,顶板跨度越大,暴露面积越多,其塑性区越发育,越不利于采空区的稳定.

2)针对采空区塑性发育的问题,提出人工矿柱支护方法,有效减小了围岩变形.

参考文献:

- [1] 袁子清,陈璐,郭利杰,等.某铅锌矿井下采空区稳定性分析及处理措施研究[J].中国矿业,2020,29(s1):449-452.
- [2] 贺小庆,凌同华,曹峰.基于FLAC^{3D}的采空区稳定性分析及处理研究[J].矿业研究与开发,2016,36(9):34-37.
- [3] 程秋亭,邓飞,陈艳红,等.采空区稳定性数值模拟分析[J].有色金属科学与工程,2015,6(2):85-88.
- [4] WANG F F, ZOU P, MENG Z H, et al. Study on stability of goaf pillars in Daqiao Phosphate Mine: theoretical calculation and field investigation[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2019, 37(3): 1483-1492.
- [5] WANG Y S, ZHENG G P, WANG X. Development and application of a goaf-safety monitoring system using multi-sensor information fusion[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 94: 103112.
- [6] YANG H Q, HAN C L, ZHANG N, et al. Stability control of a goaf-side roadway under the mining disturbance of an adjacent coal working face in an underground mine[J]. Sustainability, 2019, 11(22): 6398-6416.
- [7] 滕永海,张俊英.老采空区地基稳定性评价[J].煤炭学报,1997(5):58-62.
- [8] 张耀平,曹平,袁海平,等.复杂采空区稳定性数值模拟分析[J].采矿与安全工程学报,2010,27(2):233-238.
- [9] 刘沐宇,徐长佑.地下采空区矿柱稳定性分析[J].矿冶工程,2000(1):19-22.
- [10] 刘光清,曾鹏,赵奎,等.复杂采空区群下残矿资源回采数值模拟研究[J].矿业研究与开发,2020,40(10):8-14.
- [11] 龚甲桂,孙钦同,马庆宝,等.皇华沸石矿采空区稳定性评价及防治[J].有色金属(矿山部分),2020,72(4):54-57.
- [12] 孙国权,李娟,胡杏保.基于FLAC^{3D}程序的采空区稳定性分析[J].金属矿山,2007(2):29-32.
- [13] 童立元,刘松玉,邱钰,等.高速公路下伏采空区问题国内外研究现状及进展[J].岩石力学与工程学报,2004(7):1198-1202.
- [14] 朱合华,张琦,章连洋.Hoek-Brown强度准则研究进展与应用综述[J].岩石力学与工程学报,2013,32(10):1945-1963.
- [15] 朱永生,李鹏飞.Hoek-Brown强度准则研究进展及岩体力学参数取值[J].现代隧道技术,2020,57(1):8-17.
- [16] 赵强,黄其冲,豆玉杰.HML磷矿露天边坡岩体力学参数测试及折减方法[J].有色金属(矿山部分),2018,70(4):78-82.
- [17] 尹幸乐,苏华友,雷国荣,等.基于RMR与Hoek-Brown准则的矿岩力学参数估算[J].化工矿物与加工,2020,49(6):15-18.