

# 基于三维数值模拟与现场监测的马家地钨矿采空区稳定性分析

Stability Analysis of Majiadi Tungsten Mine Goaf Based on 3D Numerical Simulation and Field Monitoring

雷杰, 邓国梁(文山麻栗坡紫金钨业集团有限公司, 云南 文山 663607)

**摘要:**为识别和评估马家地钨矿采空区的稳定性,针对矿区的两类充填采空区,本文结合现场调研、三维数值模拟与现场监测手段开展系统分析。研究基于3DMine与FLAC3D耦合方法建立采空区精细化数值模型,以静水压力公式确定初始地应力,模拟顶底板应力、位移及塑性变形特征,并在顶板关键区域布设9个监测点验证。结果表明,采空区整体稳定性和安全性较好,现场监测顶板最大位移为24.11 mm,最大应力峰值为11.42 MPa,数值模拟最大顶板位移25 mm,二者趋势一致且均处于岩体安全范围内;矿柱应力“中部大、两端小”,局部仅出现轻微剪切与拉伸破坏,无连续塑性破坏带,说明充填封闭措施有效降低了风险。研究成果为采空区稳定性评价与安全管理提供理论支持和参考依据。

**关键词:**采空区; 三维数值模拟; 现场监测; 稳定性分析

**中图分类号:** TU457 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2025)06-0034-07

**Abstract:** To identify and evaluate the stability of the goaf in the Majiadi tungsten mine, this study conducted a systematic analysis targeting two types of backfilled goafs in the mining area. The analysis integrated field investigations, three-dimensional numerical simulation, and in-situ monitoring techniques. A refined numerical model of the goaf was established using the coupled 3DMine and FLAC3D method. Initial in-situ stress was determined using the hydrostatic pressure formula to simulate stress, displacement, and plastic deformation characteristics of the roof and floor. Nine monitoring points were deployed in critical roof areas for validation. Results indicate overall stability and safety of the goaf. Field monitoring recorded maximum roof displacement of 24.11 mm and peak stress of 11.42 MPa, while numerical simulation projected maximum roof displacement of 25 mm. Both trends align and remain within rock mass safety limits. Stress distribution in the pillar exhibited a “high in the middle, low at both ends” pattern, with only minor localized shear and tensile failures observed. No continuous plastic failure zones were detected, indicating that the backfilling and sealing measures effectively mitigated risks. These findings provide theoretical support and reference guidelines for evaluating the stability and managing the safety of goaf areas.

**Key words:** goaf; three-dimensional numerical simulation; on-site monitoring; stability analysis

## 1 前言

近年来,随着地下矿山的持续开采,采空区的占地面积不断增大,原岩应力的失衡导致安全问题逐渐凸显<sup>[1-2]</sup>,特别是顶板垮塌、地表塌陷、冒顶片帮、突水等事故频繁发生,给矿山生产安全和作业人员生命财产带来严重威胁<sup>[3-4]</sup>。由于采空区空间分布规律性差,围岩稳定性差异较大,影响稳定性的因素复杂隐蔽且具有多样性,难以全面掌握<sup>[5-6]</sup>。因此,为准确对危险性采空区进行有效处理,采空区的稳

定性评估研究亟待开展。该举措既能提高矿山安全管理的针对性和有效性,又能降低矿山生产过程中事故发生的概率,具有显著的理论和实践意义<sup>[7]</sup>。

近年来,关于采空区稳定性评价的研究不断开展,主要集中于数值模拟、现场监测及综合稳定性评价等方向。其中,数值模拟是目前应用最广泛的分析手段之一,研究者通过建立地质实体模型并引入应力边界条件,借助Phase2、FLAC3D等软件<sup>[8-9]</sup>,从二维平面到复杂三维空间多角度预测采空区的水

[作者简介] 雷杰(1987—),男,云南省文山州麻栗坡人,采矿高级工程师,主要从事与采矿相关技术与管理工作。

[引用格式] 雷杰, 邓国梁. 基于三维数值模拟与现场监测的马家地钨矿采空区稳定性分析[J]. 中国矿山工程, 2025, 54(6): 34-40.

平/垂直应力分布、位移特征及塑性演化规律。同时,采空区监测技术作为采空区稳定性评判的重要补充手段,也在研究中取得了一定的成果。王强<sup>[10]</sup>等通过综合物理探测技术对矿区进行了有效探测;尚建阁<sup>[11]</sup>等利用磁性源瞬变电磁法快速圈定了采空区的积水区域;更有研究者采用声发射和微震监测技术、探地雷达法、地震映像法等方式评估采空区的稳定性<sup>[12]</sup>。这些监测技术通过布设应力和位移监测点,实时跟踪空区关键部位的变形响应,有助于识别潜在不稳定区域,验证模拟预测结果的可信度,从而增强了致灾风险管控能力。在综合稳定性评价方面,廖宝泉<sup>[13]</sup>通过相对差异函数建立危险识别模型,提高了采空区安全性评价的可靠性;杨勇<sup>[14]</sup>等结合现场监测数据,通过数值模拟和公式法评估了空区稳定性;刘彬<sup>[15]</sup>同样结合试验、理论分析、现场调研和模拟等多手段进行了综合评价。尽管相关技术已在矿山得到广泛应用,但在监测数据与数值结果结合应用等方面仍存在提升空间。特别是在老旧矿区或充填封闭采空区的稳定性方面,仍需结合数据融合与定量化分析进一步深化研究。

本研究以马家地钨矿采空区为例,首先通过现场调研和资料收集,对采空区的现状和影响因素进行充分掌握。接着采用3DMine和FLAC3D软件进行三维数值模型的构建和模拟,分析了采空区顶板的应力、位移变化及塑性变形分布规律。同时,将模拟结果与现场实测数据进行对比分析,从而更准确判断采空区的稳定状态。该研究不仅为矿山采空区灾害防治提供了参考依据,也对矿山安全生产具有重要意义。

## 2 矿区概况与采空区现状分析

### 2.1 矿区地质概况

马家地钨矿位于云南省文山州麻栗坡县境内,矿区地质构造总体稳定,主要构造为北东、近东西及北西向断裂构造,导水性较弱,对矿井充水影响较小。矿区岩体以变质岩、花岗岩、片麻岩为主,岩石坚硬、完整性良好,工程地质条件属中等。地下水以裂隙水为主,水文地质类型简单。

该矿区的矿体为缓倾斜层状矿体,主要采用浅孔房柱法进行地下开采,开采规模为3万t/年。历史上经过长期机械化开采,已形成多个采空区,其中I-1、II-1号矿体全部采空,II-2矿体部分采空,累计开采矿石约61.1万t。

### 2.2 采空区基本现状

#### 1) ①号采空区

①号采空区是前期民采遗留空区,标高为1229~1244 m,由1220 m平硐开采形成,总长约1329 m,宽度233 m,采空区面积约4.71万m<sup>2</sup>。目前已采用废石进行充填,充填量占采空区体积70%,顶板距离废石充填面1~3 m,其余出入口均进行了封闭。

#### 2) ②号采空区

②号采空区为矿山企业开采形成的采空区,标高主要在1220~1230 m,同样由1220 m平硐开采形成,总长约98 m,宽度为65 m,采空区占地面积约为3186 m<sup>2</sup>。该空区也进行了废石充填,充填量占采空区体积80%,顶板距离充填废石1~2 m,采用相同的方式对其余出入口进行了封闭。两采空区平面分布如图1所示。



(a) ①号采空区



(b) ②号采空区

图1 采空区平面图

## 3 采空区三维数值模拟与结果分析

根据前期对矿区采空区分布状况的调研可知,由于两个采空区已经完成充填工作,现场无法深入观测内部结构,因此本研究在收集和分析详细地质资料和现场调研数据的基础上,采用数值模拟方法评估已充填采空区的稳定性。首先基于现场实测数据,在3DMine中构建采空区的三维地质模型;然后将该模型导入FLAC3D中进行网格划分,通过设置确定的边界条件和岩体参数,开展相应的数值模拟计算,最终获取采空区顶板的应力和位移分布规律

以及塑性变形特征的模拟结果。

### 3.1 模型构建方法与步骤

在采空区稳定性分析中,地应力状态的确定至关重要。本研究采用静水压力公式进行地应力初始状态的数值计算,其表达式如下:

$$\sigma_v = \gamma H \quad (1)$$

式中: $\gamma$ 为垂直地应力(MPa); $\sigma_v$ 为矿岩容重(取值 $29.2 \text{ kN/m}^3$ ); $H$ 为深度(m)。可知研究区域顶部距地表的平均深度约150 m,通过计算得出模型顶板的垂直应力约为5.0 MPa,水平方向应力则取垂直应力的二分之一,即2.5 MPa。

数值模拟计算分析所需基本数据由矿山现场选取的矿石及围岩力学测试得来,主要开展了三轴试验、单轴试验、抗拉试验等,矿岩数值模拟参数见表1。

表1 矿岩数值模拟相关力学参数

种类	单轴抗压强度/MPa	杨氏模量/GPa	泊松比	内聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa
矿石	124	48.3	0.25	17.6	43.5	8.9
岩石	151.2	54.5	0.31	20.18	53.35	10.25

在明确了地应力状态后,本研究进一步确定采空区的三维数值建模范围。根据采空区的位置及特征,将两个采空区统一纳入数值模拟分析,模型范围如图2中倾斜矩形所示。其中,矩形模型的长、宽分别为184 m和319 m,采空区矿柱高度为6 m。为准确模拟矿柱及其周边环境,矿柱部分网格划分采用 $1 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ ,其余区域采用 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 进行网格划分。

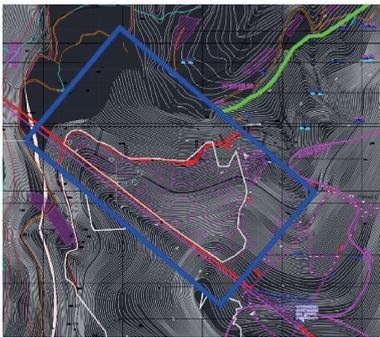


图2 采空区数值模拟建立范围示意图

利用3DMine软件对两个采空区的地质特征进行了精细的三维实体模型构建,具体如图3和图4所示。其中,因矿区地表起伏,结合现场情况,将采空区距地表高度的范围设置为400~500 m。此外,

模型中明确了顶板、底板、围岩及矿柱的具体空间位置及几何特征,以“shangbu”代表采空区顶板及上部岩层,“xiabu”代表采空区底板及下部岩层,“weiyuan”代表采空区围岩。

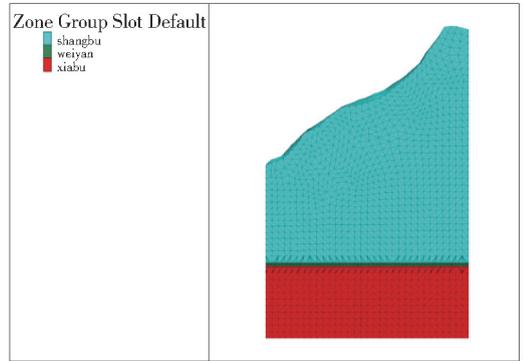


图3 采空区数值计算模型

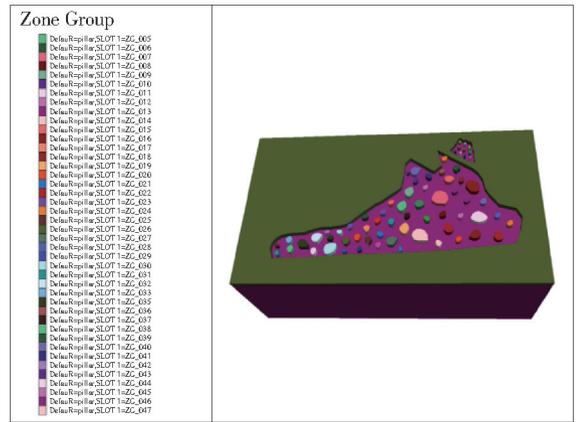
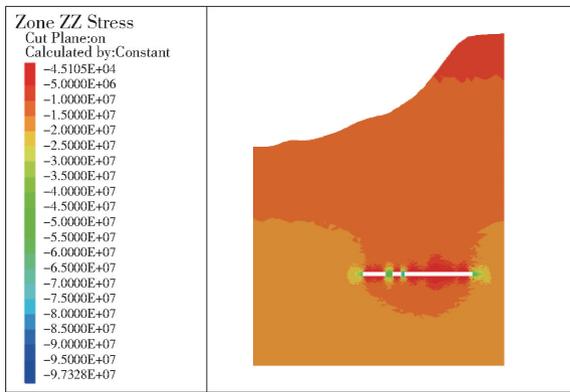


图4 采空区数值计算模型俯视图

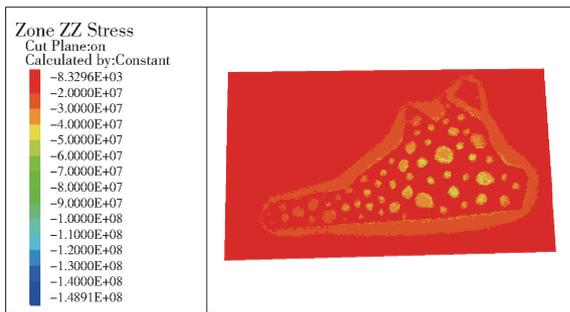
### 3.2 数值模拟结果分析

通过对上述模型进行XZ剖面和XY剖面,结合数值模拟计算,本研究得到了采空区顶底板的垂直应力分布、位移及塑性区情况,计算结果分别如图5至图7所示。

图5的应力分析结果显示,采空区顶板的应力主要集中在矿柱与顶板中部区域,矿柱的应力分布表现出“中部大、两端小”的特征。具体表现为矿柱顶部和底部周围的应力色谱颜色较浅,最大值约为40 MPa;而矿柱中部的垂直应力相对较大,周边区域呈现较为明显的橙红色,最大垂直应力可达85 MPa。尽管如此,由于中部的应力影响范围较小,实际发生变形破坏的可能性较低。总体而言,顶板区域的最大应力为40 MPa,应力分布均匀,显示出较强的承载能力和稳定性。由图6可知,顶板的最大下沉位移为25 mm,底板的最大隆起位移为22 mm,且顶

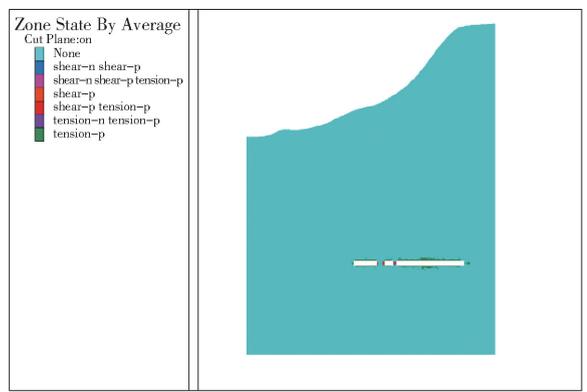


(a) XZ剖面

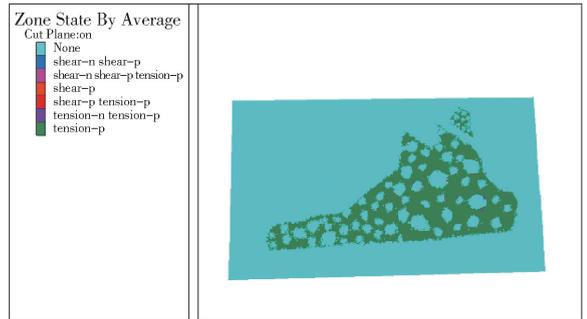


(b) XY剖面

图 5 矿区采空区垂直/水平应力分布情况

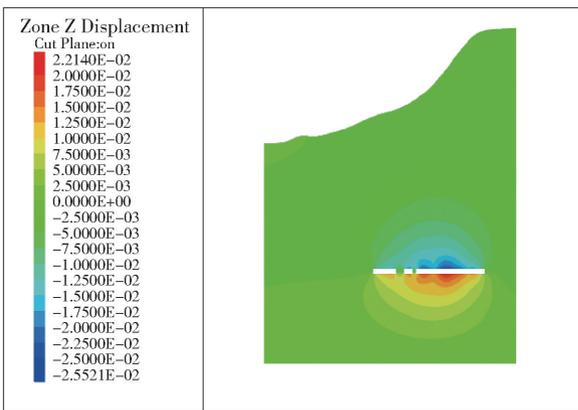


(a) XZ剖面

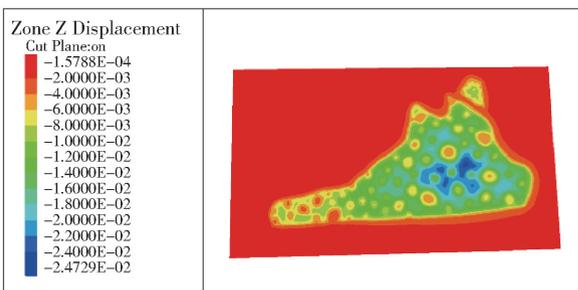


(b) XY剖面

图 7 区采空区塑性区分布情况



(a) XZ剖面



(b) XY剖面

图 6 矿区采空区顶板位移分布情况

对稳定,未出现显著的位移集中区。此外,图 7 中的塑性区分析指出,顶板整体未发生明显的塑性变形,仅在矿柱表面局部出现一定程度的剪切破坏,底板局部区域则发生了轻微的拉伸破坏,整体塑性破坏区域较小,未形成连续的塑性破坏带,表明矿柱和围岩的承载能力和稳定性较强。

综上所述,马家地钨矿采空区的顶板整体稳定性良好,应力、位移及塑性破坏区域均在可控范围内,因此该区域塌陷风险较低。但仍需加强局部矿柱的监测与维护,以确保矿区长期的安全稳定运行。

## 4 采空区现场监测与稳定性分析

### 4.1 顶板应力、位移监测方案与布置

在开展现场监测工作前,本研究首先对采空区状况进行了充分调研,发现采空区在采矿结束后均进行了充填和封闭处理。其中,封堵墙采用厚度为 1 m 的 C20 钢筋混凝土结构制成,共 5 堵,具备较强的物理隔离能力,具体如图 8 至图 12 所示。该举措在一定程度上提高了采空区的结构稳定性。

在此基础上,结合数值模拟分析的结果和现场结构特征,本研究在采空区顶板中央及易发生位移变形的关键部位布置了 9 个监测点,以准确掌握采空区顶板中暴露面积较大区域的实际应力和位移状

板、底板的整体位移范围较小,位移集中于采空区中央区域,向四周逐渐减小,说明采空区的变形状态相

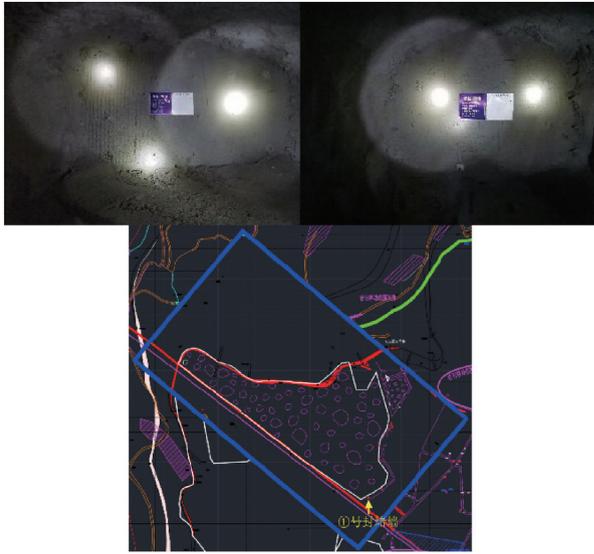


图8 ①号封堵墙现场调研及所在位置

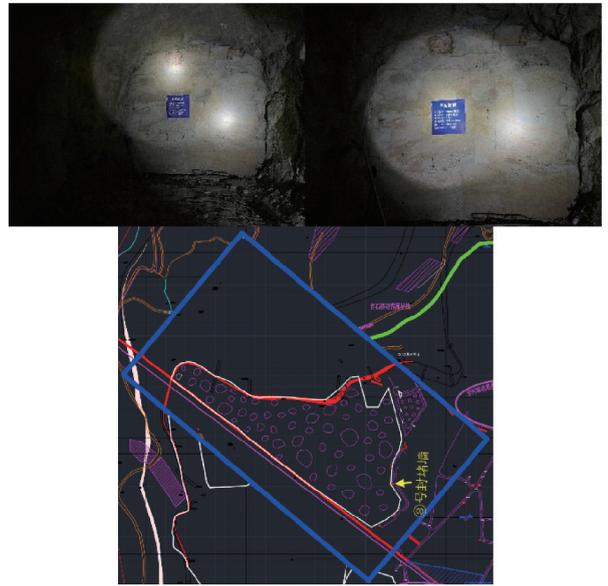


图10 ③号封堵墙现场调研及所在位置

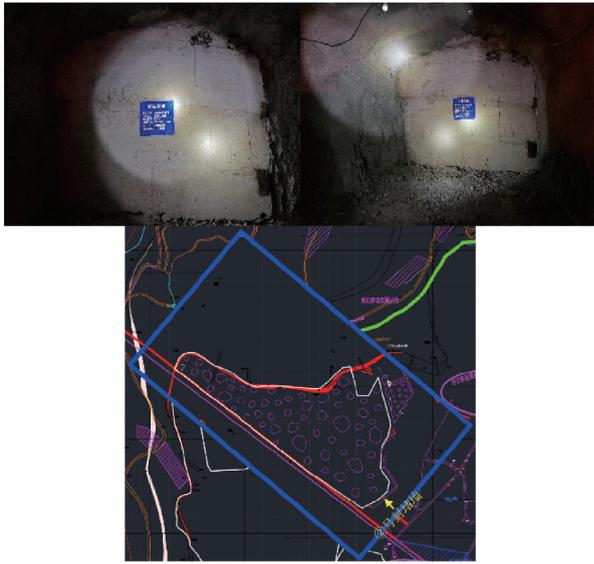


图9 ②号封堵墙现场调研及所在位置

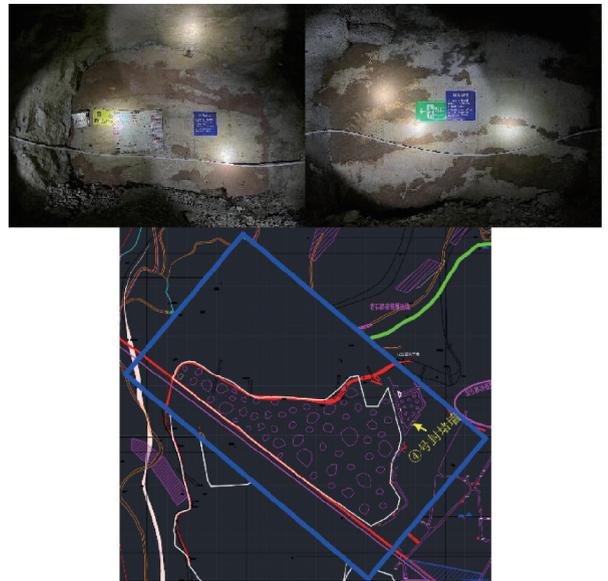


图11 ④号封堵墙现场调研及所在位置

态,为后续采空区稳定性分析提供可靠的依据。监测点坐标具体见表2,布置位置例图如图13所示。其中,监测方法采用应力监测仪和位移传感器实时记录,应力监测仪测量顶板承载压力变化,位移传感器测量顶板下沉位移。

#### 4.2 现场监测结果分析与数值模拟对比

图14所示为采空区现场应力的监测结果。由图可知,随着监测时间的推移,采空区顶板的应力表现出先小范围波动后逐渐趋于平衡的规律,大部分监测点的变化幅度较小。其中,监测点5和7的前期应力出现大幅降低,推测与采空区应力重分布趋于平衡有关,反映该区域顶板稳定性逐步增强。根

据监测数据,各监测点顶板的最大应力值分别为11.17 MPa、9.76 MPa、9.83 MPa、10.01 MPa、6.10 MPa、9.09 MPa、7.30 MPa、10.19 MPa和11.42 MPa。由于矿区岩性良好,以上应力峰值均处于矿岩体的安全承载范围内。此外,峰值过后的应力波动随时间推移逐渐减弱并趋于稳定,表明即使在暴露面积较大的采空区内,顶板仍具备较强的稳定性和较高的安全性。

矿体的开挖导致采空区的形成,对周围岩体的应力和位移状态产生一定影响。空区顶底板的位移变化能够直观有效地反映采空区的实际稳定性状况。图15所示为采空区顶板Z方向的位移监测结

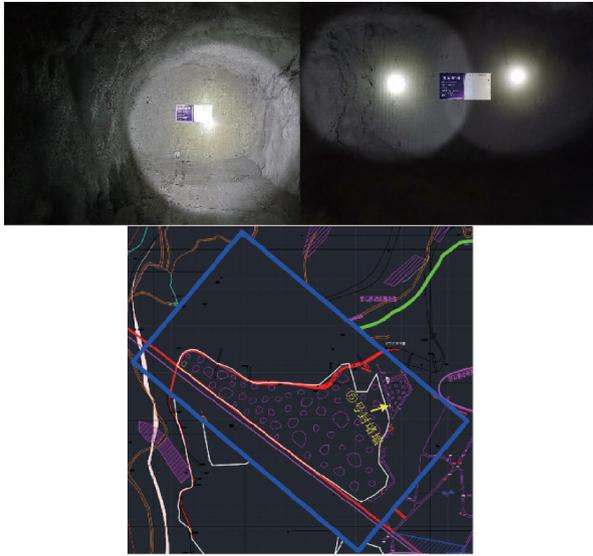


图 12 ⑤号封堵墙位置及所在位置

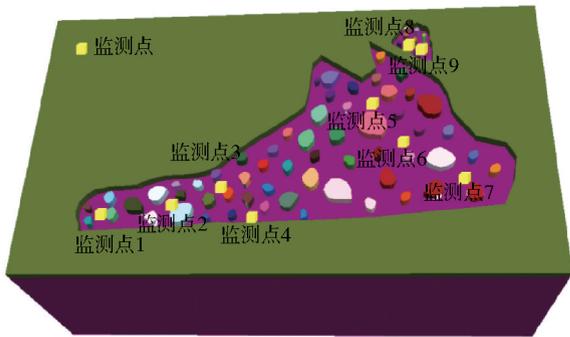


图 13 监测点布置位置例图

表 2 监测点布置坐标

监测点	坐标	监测点	坐标
1	50, 40, 119	6	263, 61, 119
2	90, 45, 119	7	211, 115, 119
3	120, 55, 119	8	234.7, 158.8, 119
4	140, 38, 119	9	241.7, 163.7, 119
5	228, 86, 119		

果。从图中可明显看出,随着计算时步的增大,各监测点顶板的Z方向位移呈现出先迅速增大后趋于稳定的变化趋势。具体监测数据显示,各监测点的最大下沉位移分别为8.38 mm、9.84 mm、12.75 mm、12.31 mm、24.11 mm、19.74 mm、18.99 mm、8.68 mm和8.39 mm,其中监测点5的下沉位移最大,为24.11 mm,其他监测点的位移量均相对较小。以上监测结果进一步验证了采空区顶板具有较强的整体稳定性,空区的安全状态良好。

对比数值模拟结果与现场实测数据可以发

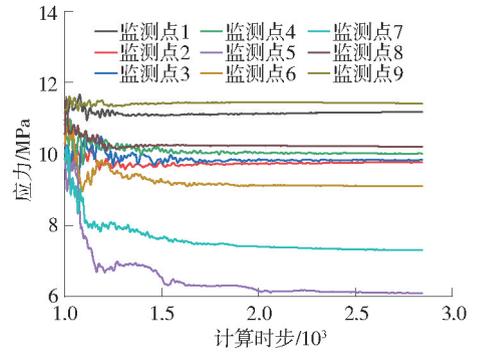


图 14 马家地矿区采空区应力监测图

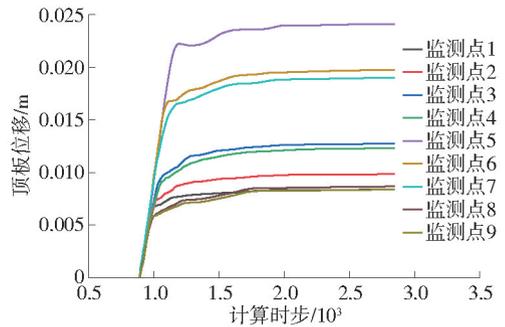


图 15 马家地矿区采空区顶板位移、应力监测图

现,二者在应力和位移分布特征及变化趋势等方面均具有较好的一致性。其中,应力集中区和位移显著区均位于矿柱与顶板中央区域,数值模拟结果显示的最大顶板位移为25 mm,与现场监测的最大位移24.11 mm非常接近。此结果验证了数值模拟方法的可靠性,表明了采空区顶板的整体稳定性较强。

## 5 结论

(1)本研究通过现场调研、三维数值模拟及现场监测发现,马家地钨矿采空区整体稳定性与安全性良好,现场监测顶板最大位移为24.11 mm,最大应力11.42 MPa,数值模拟最大顶板位移25 mm,二者变化趋势一致,均未超岩体承载极限。

(2)数值模拟与监测数据显示,采空区矿柱应力呈“中部大、两端小”特征,虽中部最大垂直应力达85 MPa,但影响范围有限;顶板无明显塑性变形,仅矿柱表面局部有剪切破坏、底板局部存轻微拉伸破坏,未形成连续塑性破坏带,结构失稳风险低。

(3)研究表明,充填和封闭措施有效提升了采空区结构稳定性。建议矿区持续加强采空区顶板应力与位移长期监测,完善充填体与封堵墙维护管理,保障矿山长期安全运行。

## [参考文献]

- [1] 吴佳锡. 金属矿山采空区处理方式及实施要点之研究[J]. 世界有色金属, 2017(20): 76 + 78.
- [2] 白小龙. 金属矿地下采空区探测、处理与安全评判方法研究[J]. 中国金属通报, 2023(4): 177 - 179.
- [3] 何德强, 石峰, 王平, 等. 黄山铜镍矿采空区顶板冒落规律研究[J]. 矿冶, 2020, 29(6): 1 - 4.
- [4] 廖圣柱, 万子轩, 贾慧涛. 微动方法在金属矿采空区三维探测中的应用——以安徽霍邱县某铁矿采空塌陷区为例[J]. 华南地质, 2023, 39(4): 643 - 654.
- [5] 张燕飞. 中煤塔山矿区隐蔽致灾因素及防治措施研究[J]. 科技与创新, 2024(13): 128 - 130.
- [6] 卫华鹏, 李文彬. 矿井隐蔽致灾地质因素及防治措施分析[J]. 能源与环保, 2019, 41(11): 28 - 30 + 35.
- [7] 王欣. 矿井隐蔽至灾因素特征和预防措施的分析总结[J]. 中国金属通报, 2018(5): 236 - 237.
- [8] 张胜光, 卿自强, 戴军, 等. 某石膏矿采空区坍塌影响数值模拟研究[J]. 采矿技术, 2022, 22(5): 105 - 108.
- [9] 刘浩, 吴倩茹, 徐力勇. 某矿采空区稳定性数值模拟研究[J]. 科技与创新, 2016(24): 15 - 16 + 19.
- [10] 王强. 综合物探方法在金属矿采空区探测中的应用——以大西沟铁矿为例[J]. 华北自然资源, 2023(2): 53 - 56.
- [11] 尚建阁, 李冰, 邢尚鑫, 等. 基于 TEM 的金属矿采空区快速探测技术——以河南西部某铝土矿为例[J]. 工程地球物理学报, 2024, 21(2): 287 - 296.
- [12] 程力, 刘焕新, 朱明德, 等. 金属矿地下采空区问题研究现状与展望[J]. 黄金科学技术, 2020, 28(1): 70 - 81.
- [13] 廖宝泉, 柯愈贤, 卿琛, 等. 基于相对差异函数的金属矿采空区危险性识别[J]. 黄金科学技术, 2021, 29(3): 440 - 448.
- [14] 杨勇, 张敏思, 张飞, 等. 红岭多金属矿复杂采空区稳定性[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(35): 14982 - 14987.
- [15] 刘彬. 某铜多金属矿采空区稳定性综合评价及治理方案研究[J]. 采矿技术, 2023, 23(6): 88 - 93.
- [16] 何荣兴, 韩智勇, 周颜军, 等. 金属非金属矿山采空区灾害特征分析及预防措施[J]. 矿业研究与开发, 2020, 40(9): 33 - 38.

(上接第 14 页)

能在下一分段更好地回收, 提升矿石回收率并降低贫化, 该方案是适应薄或中厚矿体沿走向进路布置的更优方案。

## [参考文献]

- [1] 马毅敏, 连民杰. 倾斜中厚低品位铁矿采矿方法选择与优化研究[J]. 金属矿山, 2011, (9): 12 - 15.
- [2] 秦声, 吴德义, 樊凌川. 巷道爆破掘进炮孔堵塞长度合理确定[J]. 中国矿山工程, 2021, 50(4): 1 - 4.
- [3] 吴桐, 曹朋, 路增祥. 无底柱分段崩落法进路宽度对其围岩稳定性的影响[J]. 金属矿山, 2024, (7): 9 - 16.
- [4] ZHANG Zongxian. Lost-ore mining—A supplementary mining method to sublevel caving [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2023, (168): 2 - 7.
- [5] 杨戩. 无底柱分段崩落法回采方式对放矿效果影响的研究[D]. 阜新: 辽宁科技大学, 2023.
- [6] 孙健, 陈小伟, 宫长亮, 等. 露天转地下大规模开采盘区矿柱稳定性分析[J]. 中国矿山工程, 2023, 52(5): 11 - 16.
- [7] 李示波, 高明忠, 张洪伟. 无底柱分段崩落法采切比优化研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(4): 789 - 796.
- [8] 王建国, 刘焕春, 李超. 急倾斜中厚矿体无底柱分段崩落法的放矿规律[J]. 金属矿山, 2021, 50(11): 67 - 73.
- [9] 李诗雨, 李晓宾, 黄俊, 等. 某铁矿露天转地下采矿方法选择及开采方案研究[J]. 中国矿山工程, 2025, 54(2): 54 - 62.
- [10] 王春旺. 小官庄铁矿无底柱分段崩落法下盘残矿开采技术研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2024.
- [11] 龙卫国, 何建元, 谭宝会, 等. 无底柱分段崩落法采场下盘残留矿石回采方式研究及应用[J]. 矿业研究与开发, 2023, 43(12): 1 - 7.
- [12] 杜键, 谭青, 关旭升, 等. 金山店铁矿西区矿体采矿方法优选及参数模拟[J]. 采矿技术, 2024, 24(5): 44 - 51.
- [13] 张建肇. 出矿截止品位对放矿效果的影响[J]. 采矿技术, 2022, 22(1): 11 - 14.
- [14] 杜鑫. 某铁矿露天转地下开采方案设计研究[J]. 中国矿山工程, 2018, 47(5): 47 - 72.