

矿山安全

基于FLAC^{3D}南温河钨矿河边采空区 稳定性研究

Stability Study of Riverside Goaf in Nanwenhe Tungsten Mine based on FLAC^{3D}

邓国梁(文山麻栗坡紫金钨业集团有限公司, 云南 文山 663000)

摘要:针对云南南温河钨矿河边矿区深部开采形成的复杂采空区稳定性问题,本研究基于FLAC^{3D}构建精细化三维地质力学模型,系统分析了采空区围岩应力重分布、位移演化及塑性区扩展特征。研究结果表明:采空区垂直应力集中于矿柱中部(最大40 MPa),顶板应力水平较低(5 MPa),矿柱及围岩未发生显著塑性破坏;顶板最大位移为18.06 mm,底板最大隆起位移为0.64 mm,整体变形量较小且趋于稳定;塑性区显示顶板局部存在拉伸破坏,但矿柱密集区域稳定性良好。通过对顶板10处监测点的持续模拟监测,进一步证实顶板应力(稳定值均小于1.2 MPa)与位移在计算后期均趋于平稳状态。数值模拟揭示采空区在现有充填条件下具备较高稳定性,可为水文敏感矿区灾害防控与绿色开采提供理论支撑。

关键词:南温河钨矿;采空区稳定性;FLAC^{3D};数值模拟

中图分类号:TD823

文献标志码:A

文章编号:1672-609X(2025)06-0028-06

Abstract: Aiming at the stability problem of complex goaf caused by deep mining in Hebian mining area of Nanwenhe Tungsten Mine in Yunnan province, this study builds a refined three-dimensional geomechanical model based on FLAC^{3D}, and systematically analyzes the characteristics of stress redistribution, displacement evolution and plastic zone expansion of surrounding rock in goaf. The results show that the vertical stress in the goaf is concentrated in the middle of the pillar (maximum 40 MPa), the roof stress is low (5 MPa), and the pillar and surrounding rock have no significant plastic failure. The maximum displacement of the roof is 18.06 mm, the maximum displacement of the bottom heave is 0.64 mm, and the overall deformation is small and tends to be stable. The plastic zone shows partial tensile failure of the roof, but the stability of the pillar dense area is good. Through continuous simulation monitoring of 10 monitoring points on the roof, it was further confirmed that the roof stress (with stable values all less than 1.2 MPa) and displacement tended to be stable in the later stage of calculation. Numerical simulation shows that the goaf has high stability under the existing filling conditions, which can provide theoretical support for disaster prevention and control and green mining in hydrologically sensitive mining areas.

Key words: nanwenhe tungsten ore; goaf stability; FLAC^{3D}; numerical simulation

1 前言

矿产资源开发是国民经济发展的基础性支撑。但随着浅部资源的逐步枯竭,在深部开采与复杂地质条件下,我国矿山地下采空区范围迅速扩大^[1-3]。由采空区失稳引发的地表塌陷、岩爆及次生地质灾害等已成为制约矿山安全高效生产的关键挑战^[4-6]。因此,矿山如何有效防止和避免采空区稳定造成的危害,如何从被动治理转向主动防御,是目

前亟待解决的难题。

近年来,众多学者针对地下采空区稳定性问题展开了一系列研究。徐伟兰等^[7]通过研究不同充填率下地下开采地表沉降问题,结果表明随着充填率的增加,采空区顶板最大主应力和竖向位移均降低,在保证95%充填率的情况下,地下开采对地表构筑物的影响较小。王雨萌等^[8]基于现场监测与数值模拟,得到采用废石充填的采空区能够在有效控制空区围岩塑性区发展基础上维持充填体稳定

[作者简介] 邓国梁(1987—),男,采矿高级工程师,主要从事与采矿相关技术与管理工作。

[基金项目] 国家自然科学基金(51804017)

[引用格式] 邓国梁. 基于FLAC^{3D}南温河钨矿河边采空区稳定性研究[J]. 中国矿山工程, 2025, 54(6): 28-33.

性。张晶^[9]等利用耦合数值模拟表征采空区冒落范围,提出可预测采空区冒落范围的无量纲图表。姜立春等^[10]通过数值模拟构建采空区冒落冲击底板结构响应模型,研究采空区底板结构特征及衰减规律。刘彬等^[11]采用试验与理论分析相结合的方法综合评价矿山采空区稳定性。龙斌等^[12]以某铁矿为工程背景,利用FLAC^{3D}模拟采空区围岩、顶板及矿柱情况研究采空区稳定性。向欣欣等^[13]针对复杂采空区稳定性问题进行数值模拟,分析发现采空区应力集中在顶板上部。王贺等^[14]采用三维激光扫描构建平硐与空区的三维点云模型,评估真实形态的采空区稳定性。戴水平等^[15]通过数值模拟发现,采用废石充填的采空区具有良好的稳定性,能够有效防止顶板冒落形成的冲击破坏。

云南南温河钨矿河边矿区地处紧邻南温河流域,地质构造复杂、岩体裂隙发育。至2021年,河边矿区已形成一个近5万m³的地下采空区。现有采场预计2025年将形成近15万m³的地下采空区。目前,大部分采空区基本进行废石回填,其中1135m坑老空区已完成充填和封闭隔离,累计充填量6.3万m³。针对大范围采空区稳定性问题,本研究基于FLAC^{3D}构建南温河钨矿河边矿区精细化地质力学模型,系统探究采空区围岩应力重分布特征、塑性区演化路径及长期稳定性影响,为类似矿山灾害防控与绿色开采提供理论支撑。

2 工程概况

南温河钨矿河边矿区位于仰天窝-花邱棚地表分水岭北侧沟秧河上游缓坡地带,矿体最低赋存标高位于856.65m,高于周边沟谷。矿体工程地质条件总体优良,矿区岩石以半坚硬-坚硬块状岩类、层状岩类为主,岩体结构面不发育,矿体及围岩稳固性良好。矿区各矿体均呈层状分布,产状平缓,倾角为0°~8°,最大13°,平均4.5°,均为薄矿体。基于上述矿岩稳固和矿体产状平缓的条件,矿区主要采用空场法中的条带式房柱法进行开采。利用围岩自身的稳定性,实现安全高效的回采作业。

河边采空区主要有3个,均为开采形成的采空区。图1所示为河边采空区示意图,采空区标高1080~1090m。①号采空区最高处7m,平均5.5m,空区长约102m,宽约66m,面积约6732m²。②号采空区最高处6.8m,平均5.4m,空区长约100m,宽约67m,面积约6700m²。③号采空区最

高处7.3m,平均5.6m,空区长约100m,宽约68m,面积约6800m²。3个采空区矿柱完整性好,顶板稳固,采空区留设两个出入口用于废石充填,充填区顶板距离废石1~3m,采空区其他出入口采用C25钢筋混凝土封闭,封闭厚度0.5m。

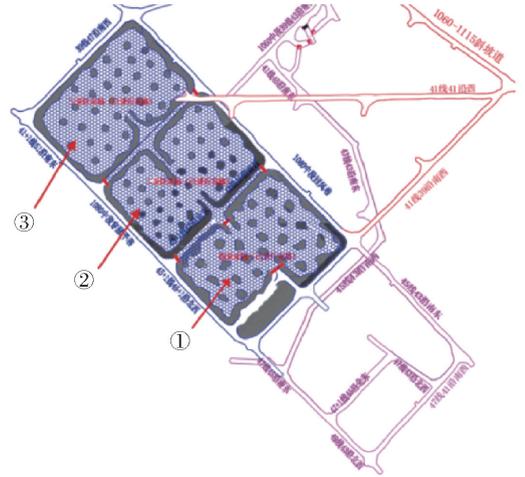


图1 河边矿区采空区示意图

3 河边采空区三维实体建模

根据前期对河边采空区分布状况的调查与探测结果,结合相关地质资料,建立FLAC^{3D}模型。模型主要针对河边矿区已经完成充填封闭工作的采空区。图2所示为中蓝色圈定矩形范围为采空区模型建立范围。本次数值模拟河边采空区模型范围坐标点为分别为:(-4056.1214, -2829.3802)、(-4056.1214, -2546.8372)、(-3735.9413, -2546.8372)和(-3735.9413, -2829.3802)。模型矩形长宽分别为640m、565m。采空区标高1080m,采空区矿柱高6m。由于空区内存在较多矿柱,其尺寸较小,采用1m×1m×1m的网格对其进行划分,其他部分采用20m×20m×20m进行网

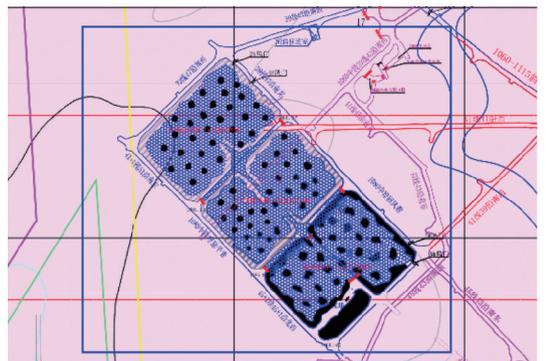


图2 河边采空区数值模拟建立范围示意图

格划分,整个模型共计 158 494 个节点,920 411 个单元,采用 Mohr-Coulomb 破坏准则。

在数值模拟中,边界条件与约束的设置对计算结果的准确性具有决定性影响。本模型将地表设为自由变形的上边界,以准确反映实际地形特征,未施加任何约束。其余五个外表面则分别施加法向约束:垂直于 X 轴的左右两侧边界、垂直于 Y 轴的前后两侧边界,以及与 Z 轴方向平行的底部边界均受到相应限制。通过合理约束五个边界的法向位移,既保证了模型在三维空间中的稳定性,又有效消除了边界效应带来的干扰,从而显著提高了模拟结果的可靠性与真实性。

FLAC^{3D}作为 FLAC^{2D}程序向三维空间的拓展,采用三维网格单元体系对岩土体等工程材料进行力学响应模拟^[16-17]。通过配置多面体单元构建复杂几何模型,能够采用多种线性或非线性本构关系描述材料特性。在外部荷载影响下,当材料达到屈服条件时,程序可模拟其塑性变形过程,并通过网格自适应调整实现结构大变形的精确模拟。该数值工具为岩土工程问题的力学分析提供了专业解决方案。

Griddle 是一款专业网格划分工具,专注于处理地质与工程中复杂的几何模型,能够高效生成表面及体网格。该软件作为 Rhino 的插件,充分借助 Rhino 的 CAD 平台,使用户能够灵活创建和编辑点、曲线、曲面及实体对象。其典型应用涵盖地质工程、隧道开挖与复杂结构建模。同时,Griddle 支持将划分好的网格导出至 Itasca 系列软件(如 FLAC3D、3DEC)以及 ABAQUS、ANSYS 等常用有限元分析平台,有效满足多种数值模拟的前处理需求。针对 FLAC^{3D}软件前处理建模功能弱的问题,利用 Rhino 软件进行复杂模型的建模,同时划分适当的网格为后续计算合理性提供保证。

根据上述河边钨矿井下未充填采空区相关实测调查,利用犀牛 Rhino 和 FLAC^{3D}建立三维数值计算模型。数值模型建立如图 3 和图 4 所示。“shangbu”代表“采空区顶板以及上部岩层”;“xiabu”代表“采空区底板以及下部岩层”;“weiyang”代表“采空区围岩”;“ore”代表“空区未采之前所存矿体”;“pillar”代表“采空区矿柱”。

4 数值模拟结果与稳定性分析

针对河边矿区复杂的采空区赋存情况,河边矿



图3 河边采空区数值计算模型

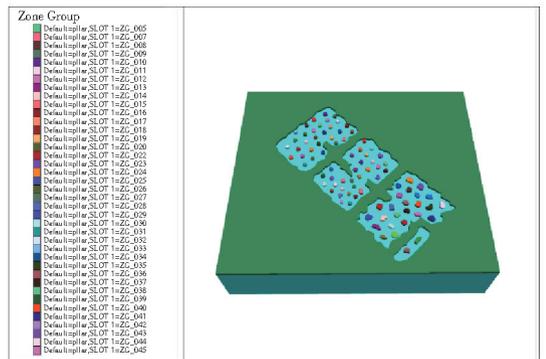


图4 河边采空区数值计算模型俯视图

区模型以坐标(320,282,1 086)和(320,300,1 086)为原点,做 XZ 剖面图和 XY 剖面图,可得采空区顶板位移、垂直应力分布以及塑性区情况。从应力、位移以及塑性区 3 个方面合理准确地分析模拟结果从而综合评价河边采空区的稳定性。

4.1 河边采空区应力分析

开采前,地下岩层处于应力平衡。矿体开采打破该平衡,致使围岩应力重分布,出现应力状态改变与应力集中。若新应力场中的应力未超围岩承载能力,围岩可自行达新平衡;反之,围岩可能被破坏,引发岩爆、片帮、冒顶等现象,影响采空区稳定性,给开采安全带来隐患。图 5 和图 6 所示分别为河边矿区采空区垂直和水平应力分布情况。从图中可以看出,河边矿区采空区垂直应力的分布规律为集中于矿柱与侧帮。矿柱中垂直应力分布规律为两头小中间大,矿柱顶部和底部中垂直应力相对较小,最大值为 15 MPa,而矿柱中部的垂直应力相对较大,最大值为 40 MPa,但大部分矿柱中部垂直应力在 23 MPa 左右,变形破坏情况不易发生。空区顶板最大应力为 5 MPa,稳定性较强。

4.2 河边采空区位移分析

在地下矿产资源开发过程中,作业区域周边岩

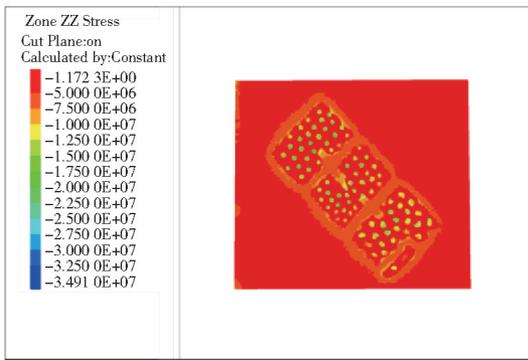


图5 河边矿区采空区垂直应力分布情况

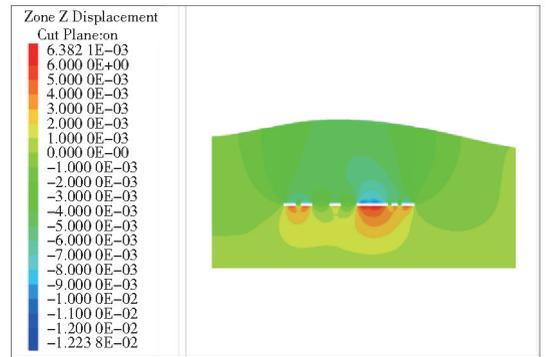
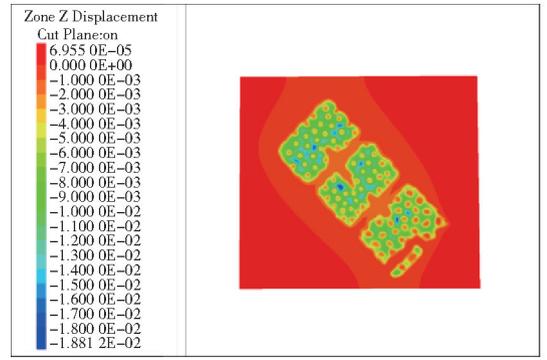


图7 河边矿区采空区顶板位移分布情况

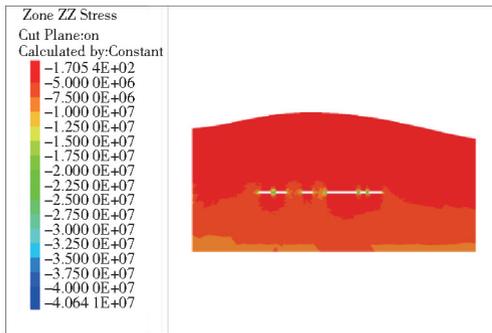


图6 河边矿区采空区水平应力分布情况

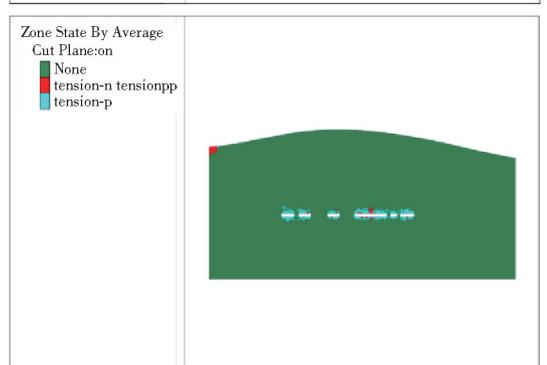
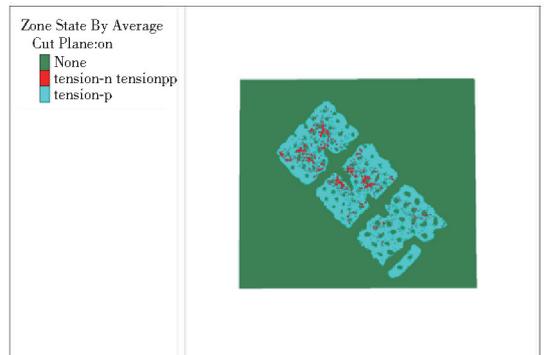


图8 河边矿区采空区塑性区分布情况

层因应力重分布产生显著形变,当围岩结构失稳时可能诱发大规模位移或破裂。其中上部岩层的突发性垮塌,不仅会形成地面沉降,危及地表建筑结构的稳定性,同时会对地下巷道系统造成动态载荷冲击。对河边矿区顶板位移情况进行模拟,结果如图7所示。从图7中可看出,采空区顶板最大位移为18.8 mm,底板最大隆起位移为0.64 mm,顶板和底板位移量均较小。

4.3 河边采空区塑性区分析

塑性区可揭示矿体回采后围岩破坏模式演化特征及采空区自稳性能。通过塑性区范围、形态与应力场的耦合分析,可定量表征围岩损伤扩展路径及应力重分布效应,进而判别采空区结构失稳的临界条件与潜在薄弱区域。结合图8河边矿区采空区塑性区分布情况图可知,模型计算过程中,矿柱的表面发生了一定量的塑性变形,空区顶板发生拉伸破坏,平衡时矿柱无塑性变形,比较稳定,部分矿柱较稀疏的区域顶板正在产生拉伸破坏。整体上,河边矿区的采空区均表现出良好的稳定性。

4.4 顶板应力、位移监测结果

根据上述分析,通过对河边采空区进行地应力、位移变形、塑性区等分布规律模拟分析,在各采空区

顶板布置10处监测点,分别监测顶板应力、位移随计算时间步数的变化状态,进一步分析采空区稳定性。如图9所示,对河边采空区顶板暴露面较大位置分别布置了10个监测点,用于监测区域内顶板的应力变化状态以及位移变化量,可为后续采空区稳

定性分析提供可靠的依据。监测点布置坐标见表1。

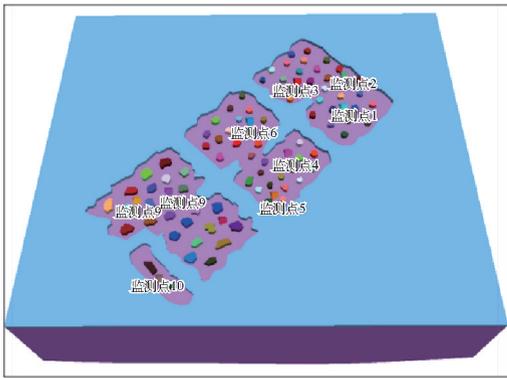


图9 监测点布置位置图

表1 监测点布置坐标

监测点	坐标	监测点	坐标
1	180,359,1 087	6	329,331,1 087
2	174,428,1 087	7	367,155,1 087
3	251,413,1 087	8	447,203,1 087
4	271,270,1 087	9	492,188,1 087
5	293,196,1 087	10	449,67,1 087

图10所示为河边矿区采空区顶板应力监测图。由图10可知,所有监测点的应力变化规律均为先为小范围的波动,而后趋于平衡,变化幅度较小。随着时间步的推移,应力变化逐渐趋向于平缓,一定程度上表明采空区顶板稳定性较强。根据监测数据可知,河边矿体开挖后,采空区顶板应力突然释放,随着时间步计算推移,采空区顶板应力又开始小幅度波动上升,然后逐渐趋向于平缓。模型稳定后各个监测点的应力值分别为0.012 MPa、1.125 MPa、0.015 MPa、0.198 MPa、0.043 MPa、0.126 MPa、0.09 MPa、0.077 MPa、0.022 MPa、0.47 MPa。这是因为河边矿区原岩应力较低、矿柱布置较为密集,顶

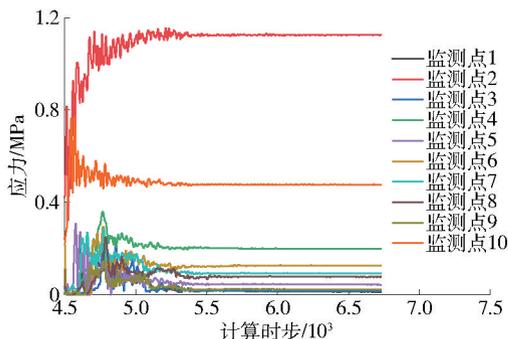


图10 河边矿区采空区顶板应力监测图

板的支撑条件较好,开挖后应力迅速释放,形成了较低的稳定应力状态。此外,南温河钨矿属于硬岩矿山,岩体整体刚度较大,能够更好地适应开挖后的应力重分布过程。这种低幅度的应力波动且快速趋于平稳的现象,说明河边采空区顶板的整体稳定性较高,安全性也较为可靠。

随着矿体开挖,采空区顶板原有的岩体应力状态被破坏,引发顶板岩体的重新分布与动态调整,表现为顶板监测点的Z方向位移在初期不断增大,随后逐渐趋于稳定。图11所示为河边矿区采空区顶板位移监测图。根据监测数据,各监测点的顶板下沉量分别为14.9 mm、8.65 mm、14.7 mm、18.06 mm、9.29 mm、15.3 mm、11.4 mm、13.8 mm、10.07 mm和5.64 mm,其中最大位移量出现在监测点4,为18.06 mm。其他监测点的顶板位移均低于该值,且总体位移幅度较小,说明虽然顶板经历了一定的下沉变形,但整体变形范围有限,位移逐渐稳定于较小范围之内。这表明河边采空区顶板经历了初期的应力扰动与变形调整后,岩体逐渐进入新的稳定状态,整体稳定性较强,安全性较高。

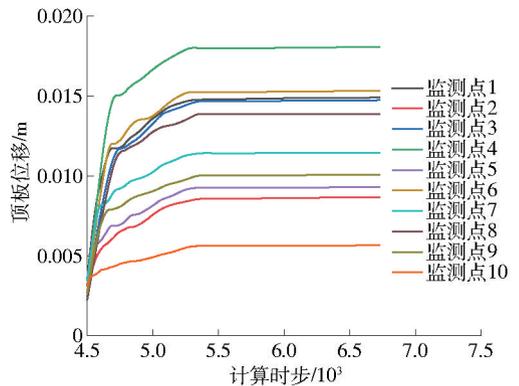


图11 河边矿区采空区顶板位移监测图

综合以上位移、应力数据的分析,河边采空区顶板位移最大仅18.06 mm,且后期趋于稳定,整体顶板未出现剧烈沉降,稳定性较强;顶板应力整体处于较低范围(均在1.2 MPa以下),且随时间趋于稳定,没有出现持续性的剧烈波动,应力状态良好;河边矿区岩体为硬岩,整体抗变形、抗破坏能力较强,进一步保障了采空区的稳定性。

5 结论

通过FLAC^{3D}精细化三维数值模拟,结合顶板应力与位移监测分析,对南温河钨矿河边采空区稳定性进行了系统研究,得出以下主要结论:

(1)采空区垂直应力集中于矿柱中部(峰值40 MPa),顶板应力水平较低(5 MPa),矿柱与围岩未超出承载极限,表明在当前矿柱尺寸和布置密度下,矿柱及围岩整体应力水平未超出其承载极限,现有矿柱支撑体系能有效控制应力集中并维持整体稳定。

(2)顶板最大位移为18.06 mm,底板隆起仅0.64 mm,位移量均处于安全范围且随时间趋于稳定,验证了充填措施对控制围岩变形的有效性。通过顶板10个监测点的模拟监测数据进一步证实,所有监测点的位移在计算初期增长后均迅速趋于稳定,且整体位移量级处于工程安全允许范围内。

(3)塑性区演化分析表明,采空区顶板局部区域(尤其在矿柱相对稀疏处)发生了拉伸破坏,这是顶板岩体自重作用下的典型破坏模式。然而,在矿柱密集支撑区域,矿柱本身及周围岩体未发生持续塑性变形,表现出良好的稳定性。综合来看,采空区整体自稳能力较强,满足矿区安全生产的长期稳定性要求。

本研究为南温河钨矿河边采空区的稳定性提供了科学评估,表明其在现有治理措施下安全可靠。研究成果为类似硬岩矿山深部开采的灾害防控与绿色开采提供技术参考。后续加强采空区长期监测,重点关注稀疏矿柱区域的顶板拉伸破坏风险,以保障矿区安全生产。

[参考文献]

[1] 杜岩,张洪达,谢谟文,等. 矿山采空区边坡动态稳定性评价方法[J]. 工程科学学报,2025,47(2):215-223.

[2] 程爱平,杜澳宇,楚立申,等. 考虑拱效应的高阶段充填体下采空区顶板跨度和厚度计算模型[J]. 采矿与安全工程学报,2025,42(1):218-228.

[3] 王长军,卢磊芬,冯庆杰,等. 三贵口铅锌矿矿柱及采空区稳定性分析研究[J]. 矿业研究与开发,2024,44(7):49-56.

[4] 葛阳,王航龙,李克钢,等. 基于FLAC^{3D}的极近距离采

空区覆岩垮落规律数值模拟研究[J]. 中国矿业,2023,32(2):97-103.

- [5] 蔡鑫,黄涯帅,周子龙,等. 基于矿柱失稳风险分析的采空区关键矿柱重定义与辨识[J]. 岩石力学与工程学报,2024,43(1):216-225.
- [6] 刘艳彪,刘子涵,王瑞强,等. 基于DEMATEL-ISM的采空区稳定性模糊评价[J]. 黄金科学技术,2025,33(1):149-158.
- [7] 徐伟兰,刘毓,王朝隆,等. 基于数值模拟的充填采矿地表移动规律研究[J]. 有色金属工程,2024,14(6):144-151.
- [8] 王雨萌,关凯,朱万成,等. 基于现场监测与数值模拟结合的采动诱发围岩失稳与地表沉降研究[J]. 东北大学学报(自然科学版),2024,45(2):234-243.
- [9] 张晶,任凤玉,刘洋,等. 耦合 π 定理与数值模拟的采空区冒落范围预测[J]. 采矿与安全工程学报,2025,42(2):264-272.
- [10] 姜立春,李金柱,李萍丰,等. 顶板垮塌激励下多中段采空区底板响应特征研究[J]. 岩土力学,2025,46(3):916-929.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 向欣欣,张耀平,刘书瑶. 基于FLAC^{3D}的多层复杂采空区稳定性研究[J]. 矿业工程,2024,22(2):20-24.
- [14] 王贺,张驰. 基于三维激光扫描空区精细化稳定性分析[J]. 有色金属(矿山部分),2023,75(5):70-75.
- [15] 戴水平,李恒,李佳建. 基于数值模拟的大型采空区稳定性数值模拟研究[J]. 采矿技术,2023,23(5):126-132.
- [16] 刘星宇,王飞,汪军琪. 房柱采空区下工作面切眼巷积水区探测及煤柱应力研究[J]. 煤炭工程,2024,56(8):132-137.
- [17] 叶海旺,邓毕军,陈东方. 基于RSM-FLAC的石墨矿采空区失稳概率定量评价[J]. 矿业研究与开发,2025,45(1):112-119.