某瓷石矿山尾矿库对矿井工程稳定性的影响*

裴新桐[1],李阳明[2,3,4],蔡序淦[5],张莉鹏[5],滕龙[2,3,4],高超[2,4,6]

(1.煤炭工业太原设计研究院集团有限公司, 山西 太原 030001;
2.长沙矿山研究院有限责任公司, 湖南 长沙 410012;
3.金属矿山安全技术国家重点实验室, 湖南 长沙 410012;
4.湖南省矿山地质灾害防治与环境再造工程技术研究中心, 湖南 长沙 410012;
5.中国有色金属工业西安勘察设计研究院有限公司, 陕西 西安 710054;
6.国家金属采矿工程技术研究中心, 湖南 长沙 410012)

摘要:尾矿库的安全稳定是确保地下协同开采的关键。为探究尾矿库对矿井工程的影响,以某含锂瓷石矿为研究对象,采用GTS/NX与FLAC3D耦合建模方法,建立三维地质-结构模型,开展尾矿库淹没线内+225 m平硐封堵长度优化及尾矿库对矿体开采稳定性的影响分析。结果表明:不同封堵长度下平硐围岩的应力、位移与塑性区变化显著,105 m为最优封堵长度,此时平硐口拉应力降至0.20 MPa,位移变形为8 mm,封堵区无塑性区产生,可有效控制尾矿库水压力,保障平硐稳定;对比有无尾矿库条件下矿体开采的力学响应,发现有尾矿库时,采空区顶板拉应力由无尾矿库的0.87 MPa降低至0.84 MPa,位移由无尾矿库的15 mm减小至14 mm,且采空区塑性区未与地表及尾矿库塑性区贯通。因此,在当前工程与地质条件下,尾矿库并非矿体开采稳定性的主导因素,但在后续开采过程中仍需加强应力与变形监测。研究结果可为类似矿山尾矿库与地下开采协同安全设计与评估提供方法参考与数据支撑。

关键词:尾矿库;稳定性分析;封堵长度;耦合建模;开采影响

中图分类号:TD926.4;TD87 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)09-0176-10

Influence of Tailings Pond on the Stability of Mine Engineering in a Porcelain Stone Mine

Pei Xintong[1], *Li Yangming*[2,3,4], *Cai Xugan*[5], *Zhang Lipeng*[5], *Teng Long*[2,3,4], *Gao Chao*[2,4,6]

(1.Taiyuan Design Research Institute for Coal Industry Group Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi 030001, China;
2.Changsha Institute of Mining Research Co., Ltd., Changsha, Hunan 410012, China;
3.State Key Laboratory of Safety Technology of Metal Mines, Changsha, Hunan 410012, China;
4.Hunan Provincial Engineering Research Center for Mine Geological Disaster Prevention and Control and Environmental Reconstruction, Changsha, Hunan 410012, China;
5.China Nonferrous Metals Industry Xi'an Investigation and Design Research Institute Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710054, China;
6.National Engineering Research Center for Metal Mining, Changsha, Hunan 410012, China)

Abstract: The safety and stability of the tailings pond are crucial for ensuring underground collaborative mining. To investigate the influence of the tailings pond on mine engineering, a three-dimensional geological-structural model of a certain lithium-containing porcelain stone mine was established using the coupled GTS/NX and FLAC3D modeling method, and the optimization of the sealing length of the +225 m adit within the inundation line of the tailings pond and the analysis of the influence of the tailings pond on the stability of ore body mining were conducted. The results show that significant changes are observed in the stress, displacement, and plastic zone of the surrounding rock of the adit under different sealing lengths. The optimal sealing length is determined to be 105 m, at which the tensile stress at the adit opening is reduced to 0.20 MPa, the displacement deformation is 8 mm, and no plastic zone is generated in the sealing area, so that the water pressure of the tailings

* **收稿日期**:2025-12-23

基金项目:京津冀环境综合治理国家科技重大专项项目(2026ZD1210200);中国五矿集团有限公司全国重点实验室专项资金项目(2024GZKJ01,2024GZKJ03);中央引导地方科技发展资金以奖代补和事后补助项目(ZX25J010)

作者简介:裴新桐(2000—),女,河北衡水人,助理工程师,主要从事采矿技术研究。E-mail:15130821786@163.com

通信作者:李阳明(1996—),男,湖南炎陵人,硕士,工程师,主要从事矿山防治水及水文地质研究。E-mail:1014279825@qq.com

pond can be effectively controlled and the stability of the adit can be ensured. It is found from the comparison of the mechanical responses of ore body mining under conditions with and without the tailings pond that, when the tailings pond is present, the tensile stress of the roof of the mined-out area is reduced from 0.87 MPa (under the condition without the pond) to 0.84 MPa, the displacement is reduced from 15 mm to 14 mm, and the plastic zone of the mined-out area is not connected with the surface or the plastic zone of the tailings pond. Therefore, under the current engineering and geological conditions, the tailings pond is not the dominant factor for the stability of ore body mining. However, stress and deformation monitoring still needs to be strengthened during the subsequent mining process. The research results can provide method reference and data support for the collaborative safety design and assessment of tailings ponds and underground mining in similar mines.

Key words: Tailings pond, Stability analysis, Sealing length, Coupled modeling, Mining impact

0 引言

矿山行业是国民经济的重要基础,安全生产始终是矿产资源开发的关键问题[1-3]。尾矿库作为矿山不可或缺的配套设施,其稳定运行不仅关系矿山安全,也对周围环境保护具有重要意义。近年来,随着矿山开采逐步向深部及地质条件复杂区域推进,尾矿库与地下采场之间的相互作用显著增加,尤其在尾矿库淹没线与井下工程相邻的情况下,尾矿库水压及渗透效应对巷道封堵结构乃至采场围岩稳定性造成潜在威胁[4-7]。因此,开展尾矿库与地下开采协同稳定性分析,对实现矿山安全高效生产具有重要意义。

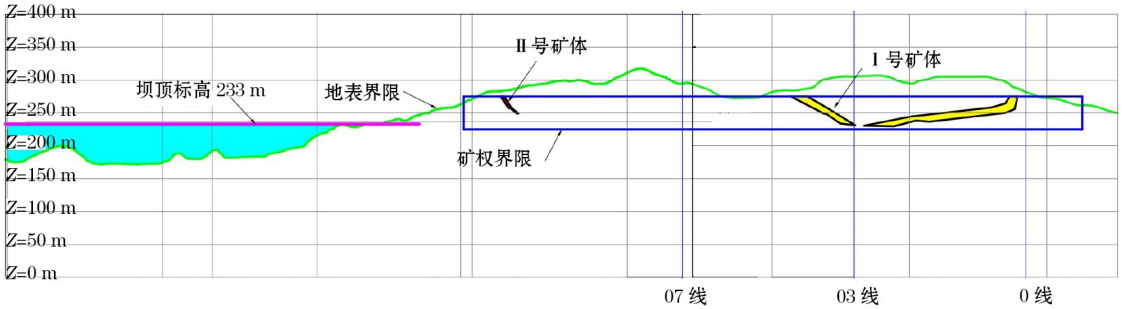
近年来,国内外学者在尾矿库稳定性评价方面开展了广泛的研究。数值模拟技术因其能够处理复杂地质建模与岩土体非线性力学响应而得到广泛应用。高鹏飞等[8]通过 GTS/NX 构建排土场-尾矿库模型,分析发现尾矿库渗流对排土场-尾矿库模型稳定性影响较大,最终导致安全系数降低至 1.23,需加强渗流控制。宋志飞等[9]利用 GTS/NX 分析不同降雨条件下的尾矿库稳定性,随着降雨持续时间和降雨强度的增加,尾矿库堆积的孔隙水压力逐渐增大,安全稳定性降低。刘红岩等[10]采用 FLAC3D 对尾矿库在正常水位及洪水位下的稳定性进行模拟,发现随着尾矿库水位的增加,尾矿库应力和位移均呈现增加趋势,导致尾矿坝的稳定性降低。琚海桥等[11]利用 GTS/NX 构建复杂地形条件下尾矿库的三维模型,开展渗流场变化规律以及渗透稳定性分析,结果表明,尾矿坝空间渗流特征显著,当尾矿库高度增加时可通过排渗设施实现浸润线控制。邓红卫等[12]基于渗流-应力耦合机理,采用 GTS/NX 建立尾矿库三维地表模型,探究干滩长度对尾矿库的渗流及稳定性影响,结果表明,随着干滩长度的减小,尾矿库孔隙水压力逐渐增大、位移量逐渐减小。范博文等[13]利用 FLAC3D 建立某尾矿库的三维模型,研究尾矿库的位移、有效应力变化,分析发现有效应力和位移变化呈现出阶段性规律,与输入地震波的振幅分布规律一致。蒋京名等[14]根据矿床的赋存条件,通过 GTS/NX 模拟,研究尾矿库下矿体在地下开采过程中产生的岩层移动和变形对尾矿库及坝体的影响,确定安全保护岩柱总厚度应大于 135.28 m。

综上所述,现有研究主要集中于渗流、震动、降雨等外部因素对尾矿库稳定性的作用机制与影响,而针对尾矿库作为外部静荷载与持续渗水源对地下矿井工程稳定性的作用机制研究相对较少。因此,本文以某含锂瓷石矿为例,针对其 225 m 平硐位于尾矿库终期淹没线内、Ⅱ号矿体距尾矿库仅 60 m 的两类典型工程情境,提出 GTS/NX-FLAC3D 耦合建模方法,系统开展平硐封堵长度稳定性分析与尾矿库对矿体开采影响的对比研究,以期为类似条件下矿山安全开采与尾矿库协同运行提供科学依据。

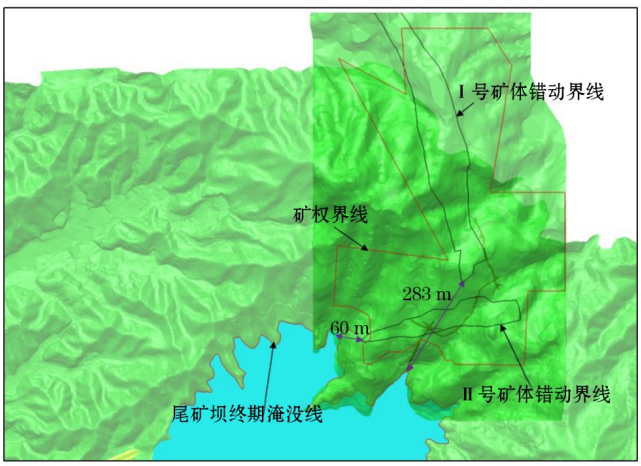
1 工程概况

某含锂瓷石矿采用地下开采方式,开采为+275~+225 m 标高之间的矿体,有+265 m、+225 m 两个中段,其中+265 m 中段为回风中段,+225 m 中段为生产中段。采矿方法为浅孔留矿法,生产规模为 3 万 t/a。尾矿库位于选矿厂东南方向约 5 km 的沟谷内,整体呈西北-东南走向,库区占地面积约为 340 hm^2。图 1 给出了矿体与尾矿库的位置关系。从矿区范围与尾矿库的位置来看,矿区西南角和尾矿库终期淹没线相接,有小部分相交,Ⅱ号矿体开采形成的岩层移动界线与尾矿库终期淹没线的最近水平距离为 60 m;从矿区内设施布置来看,矿区内设施除 225 m 平硐口(长约 45 m,断面尺寸 3.8 m×3.2 m)位于尾矿库终期淹没线内,其他均在尾矿库终期淹没线之外,其中大部分位于分水岭另一侧。尾矿库下渗会抬升地下水位、软化岩体,降低Ⅱ号矿体周边围岩与矿柱强度,坝体荷载产生的附加应力场与采动应力叠加,影响采空区与巷道的长期稳定。

在极端工况下,尾矿库可能会失稳,将直接威胁邻近矿井工程的安全。



(a) 矿体赋存空间关系



(b) 岩体移动范围线

图 1 矿体与尾矿库的位置关系

Fig.1 Location relationship between orebody and the tailings pond

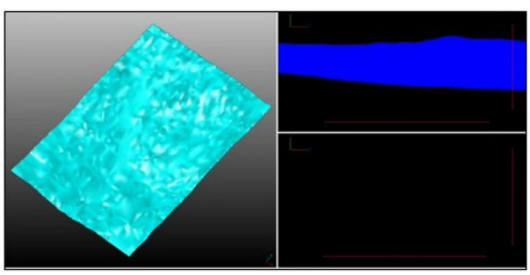
2 GTS/NX-FLAC3D 耦合建模

2.1 建模方法

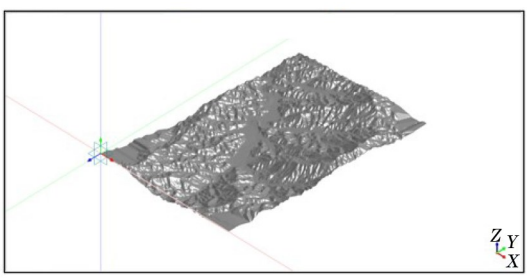
FLAC3D 在应对复杂三维工程模型时,其几何建模与单元网格划分的前处理过程通常较为繁琐、工作量庞大,因此耗时较长,这在一定程度上增加了利用该软件处理复杂三维工程问题的整体难度[15-16]。然而,GTS/NX 在复杂地形表面建模和高质量网格划分方面具有显著优势,与 FLAC3D 在非线性岩土力学计算方面的优势互补。因此,本次建模采用 3Dmine、GTS/NX 软件相互配合,协同建立矿山三维力学分析模型。基于 MIDAS-GTS/NX 建立地形及地表模型,随后将模型导入 FLAC3D 软件,并生成矿山平硐、尾矿库及围岩地层的数值分析模型。

2.2 多元介质三维力学分析模型

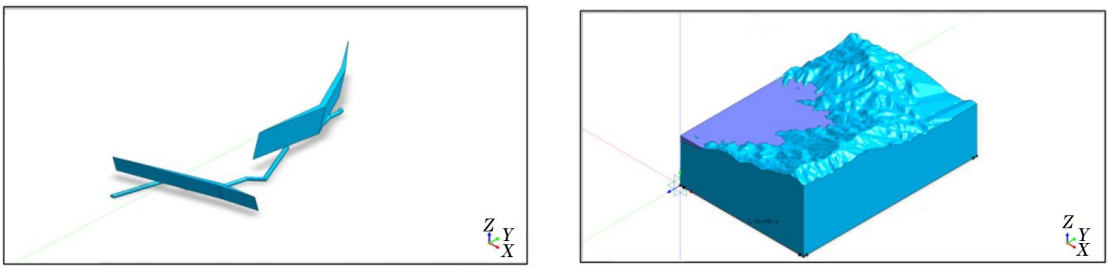
模型建立过程如图 2 所示,建模范围为矿区东西方向 990 m,南北方向 1 567 m,垂直方向从−315 m 延伸至地表。模型共包含 475.2 万个单元和 112.4 万个节点。为了分析尾矿库对矿体开采的影响,建立了有、无尾矿库两种条件下的三维数值分析模型,如图 3 所示。



(a) 地表等高线处理



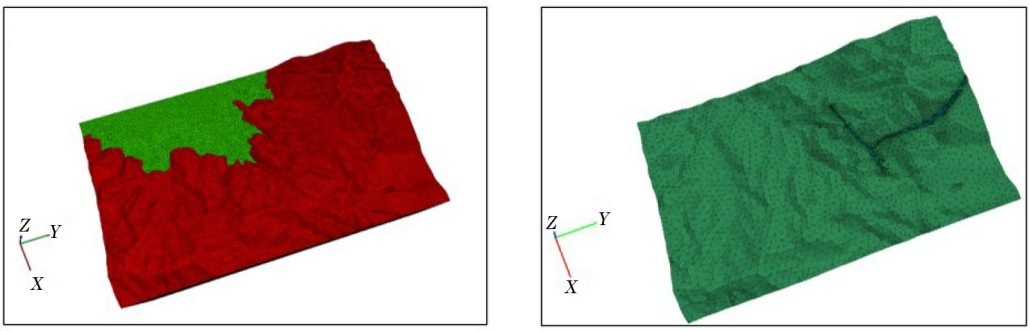
(b) 地表模型生成



(c)三维等高线处理 (d)三维模型生成

图 2 模型建立过程

Fig.2 Model establishment process



(a)有尾矿库 (b)无尾矿库

图 3 三维数值模型

Fig.3 3D numerical models

2.3 边界条件及初始应力场

矿山三维模型是从地层中截取获得的,开展三维仿真力学分析时,需满足原始地层边界条件及应力场关系[17-18],通过限定模型边界条件实现地层约束。限定模型四周与底部边界,地表不施加任何的边界,即自由场边界,详细约束条件如图 4 所示。初始应力场均按照自重应力场生成,屈服准则采用 Mohr-Coulomb 破坏准则。

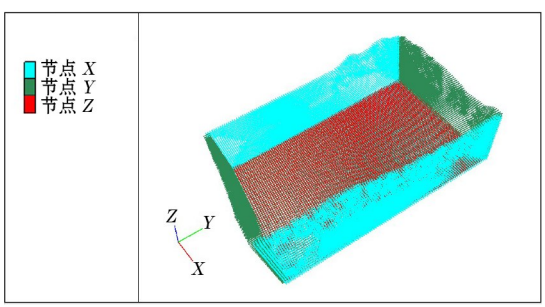


图 4 模型节点约束

Fig.4 Nodal constraints of the model

2.4 力学参数

GTS/NX-FLAC3D 耦合建模的岩体力学参数见表 1。

表 1 岩体力学参数

Table 1 Mechanical parameters of rock mass

材料类型	密度/(g/cm³)	弹性模量/MPa	泊松比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
尾矿库材料	19.0	500	0.35	8.5	27
强风化花岗岩	1.97	2 500	0.30	500	25
中风化花岗岩	2.15	3 500	0.25	750	28
微风化花岗岩	2.40	8 760.19	0.22	990	31.54
C30 混凝土	2.36	30 000	0.15	5 000	40

3 平硐封堵长度稳定性分析

为探明 225 m 平硐封堵后对矿山开采工程的影响,设计不同封堵长度方案,分别为:20 m、30 m、40 m、50 m、60 m、80 m 及 105 m,封堵材料为 C30 混凝土。经过多次数值模拟计算得到不同封堵长度时 225 m 平硐围岩的应力、变形位移、应变增量及塑性区分布分析结果,见表 2。由表 2 可知,随着封堵长度增加,平硐口的拉应力、位移变形及塑性变形范围显著减小。该现象表明,封堵结构存在临界长度。当封堵长度不足(小于 80 mm)时,封堵体强度有限,难以抵御上部荷载。而当封堵长度达到 105 m 时,各项指标最小且趋于稳定(拉应力 0.20 MPa,

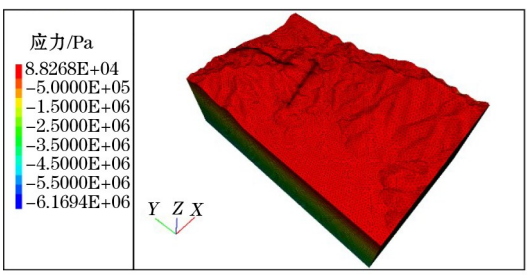
位移 8 mm,塑性区消失),表明此时 C30 混凝土封堵墙与围岩结构紧密结合。该结构不仅能有效支撑平硐上部岩层,有效控制其应力发展转移,而且能够阻断尾矿库水的渗流路径,从根本上控制了水压对平硐稳定性的影响。依据位移变形量判定标准可知,当封堵长度为 105 m 时,能够满足平硐围岩稳定的要求。

表 2 不同封堵长度时 225 m 平硐围岩稳定性分析结果

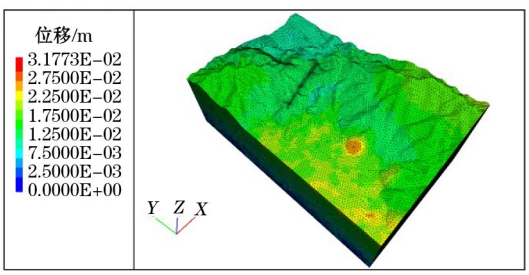
Table 2 Analysis results of surrounding rock stability of 225 m adit under different plugging lengths

封堵长度/m	拉应力/MPa	位移变形/mm	应变增量	塑性区单元/个
0	0.84	20	1.68×10^{-3}	7
20	0.60	18	1.42×10^{-3}	6
30	0.41	17	1.25×10^{-3}	4
40	0.35	15	1.12×10^{-3}	3
50	0.30	13	0.65×10^{-3}	3
60	0.25	10	0.52×10^{-3}	2
80	0.21	9	0.48×10^{-3}	1
105	0.20	8	0.40×10^{-3}	0

平硐封堵长度为 105 m 时,模型的最大主应力和位移云图如图 5 所示。



(a) 最大主应力云图



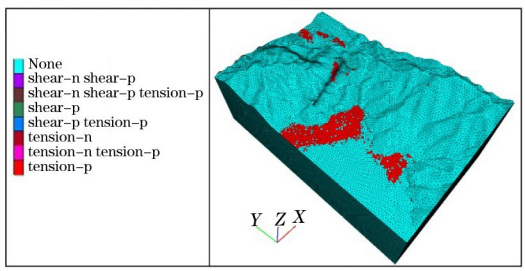
(b) 位移云图

图 5 平硐封堵长度为 105 m 时的模型应力和位移

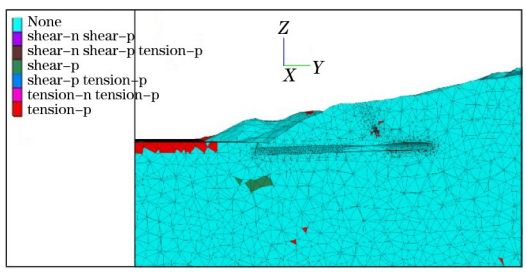
Fig.5 Stress and displacement of the model with 105 m adit sealing length

由图 5 可知,模型的应力受地形的影响,应力随深度增加而增大,越接近地表最大主应力值越小。岩层交界部位、井下工程位置的扰动状态较大。地表和岩层浅部存在一定的拉应力,最大拉应力值约为 0.20 MPa,地表全风化岩层易受拉破坏。尾矿库淹没 225 m 平硐后,平硐处的压应力为 1.0 MPa 左右,小于花岗岩的抗压强度。位移和应变增量均主要发生在尾矿库及尾矿库与山体斜坡交界处的位置,封堵长度为 105 m 时,平硐口处的位移变形为 8 mm,小于围岩安全控制限值,围岩处于稳定状态。

平硐封堵长度为 105 m 时,模型的塑性区分布云图如图 6 所示,图中色块代表围岩的塑性状态(颜色标识见电子版)。由图 6(a)可知,塑性区主要产生在尾矿库及尾矿库与山体斜坡交界处,这是因为在尾矿库的压力作用下,山体斜坡地表全风化岩层发生变形,产生塑性状态。由图 6(b)可知,假设 225 m 平硐被淹没后,在封堵区域没有产生塑性区单元,即平硐及其周围巷道在一定长度范围内没有产生塑性区,表明采用平硐封堵长度为 105 m 的方案可以有效控制尾矿库对矿山平硐稳定性的影响。



(a) 整体模型塑性区



(b) 围岩塑性区分布

图 6 平硐封堵长度为 105 m 时的模型塑性区分布

Fig.6 Plastic zone distribution of the model with 105 m adit sealing length

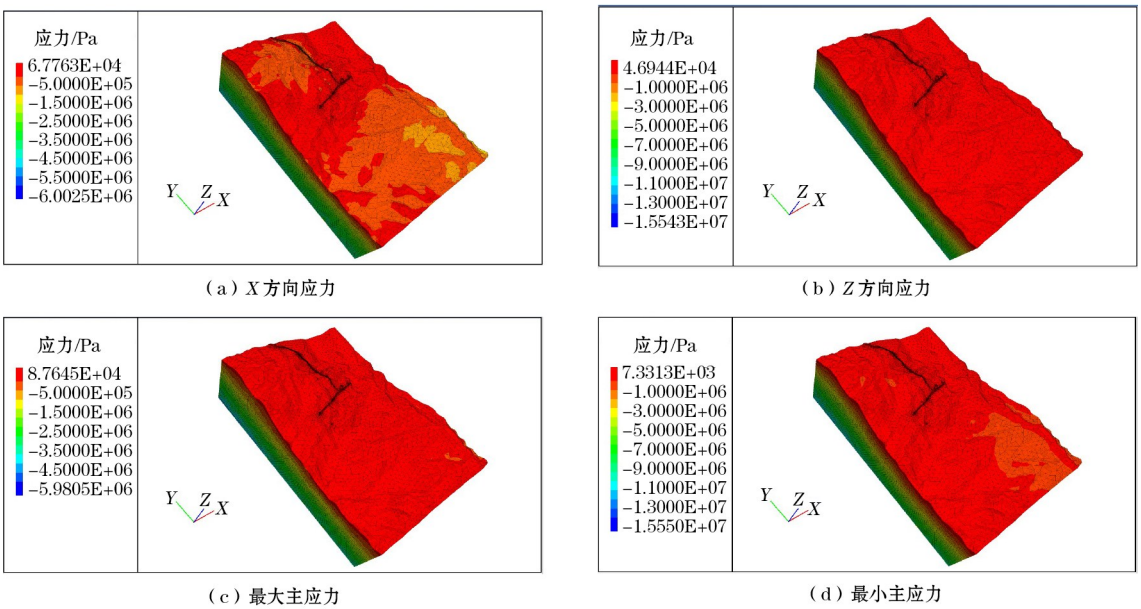
4 尾矿库对Ⅱ号矿体开采稳定性的影响

4.1 应力分析

无尾矿库和有尾矿库条件下矿体模型的应力分布云图分别如图 7 和图 8 所示,图中拉应力为正,压应力为负。从图 7 和图 8 可知,整体模型的应力受到地形的影响,应力随着开采深度的增加而逐渐增大,越接近地表应力越小,在岩层的交界部位及井下工程周边出现明显的应力扰动。浅部岩层及地表均

出现拉应力,最大拉应力约为 0.31 MPa,导致地表全风化岩层处于受拉易损状态,这一现象在无尾矿库和有尾矿库两种模型下均存在,说明浅部拉应力主要受地形与浅表岩性控制,受尾矿库的影响较小。

然而,两种模型的采空区顶板拉应力分布存在细微差异,无尾矿库模型的采空区顶板拉应力为 0.87 MPa,有尾矿库模型的采空区顶板拉应力为 0.84 MPa,两者相差 0.03 MPa,降幅约为 3.4%。这表明尾矿库并非单纯的附加荷载,其通过上覆岩层传递,对采空区两侧围岩产生了一定的侧向约束效应,这相当于轻微增强了“应力拱”的拱脚支撑,从而略微改善了顶板的拉应力集中状态。从两种模型的 X 方向和 Z 方向应力云图中亦可观察到,在尾矿库荷载作用下,周边岩体的应力传递路径发生局部重分布。整体上来说,尾矿库的设置并未显著改变区域应力场的基本规律,但对开采引起的局部应力集中,尤其是采空区顶板拉应力状态,具有一定的缓解作用。

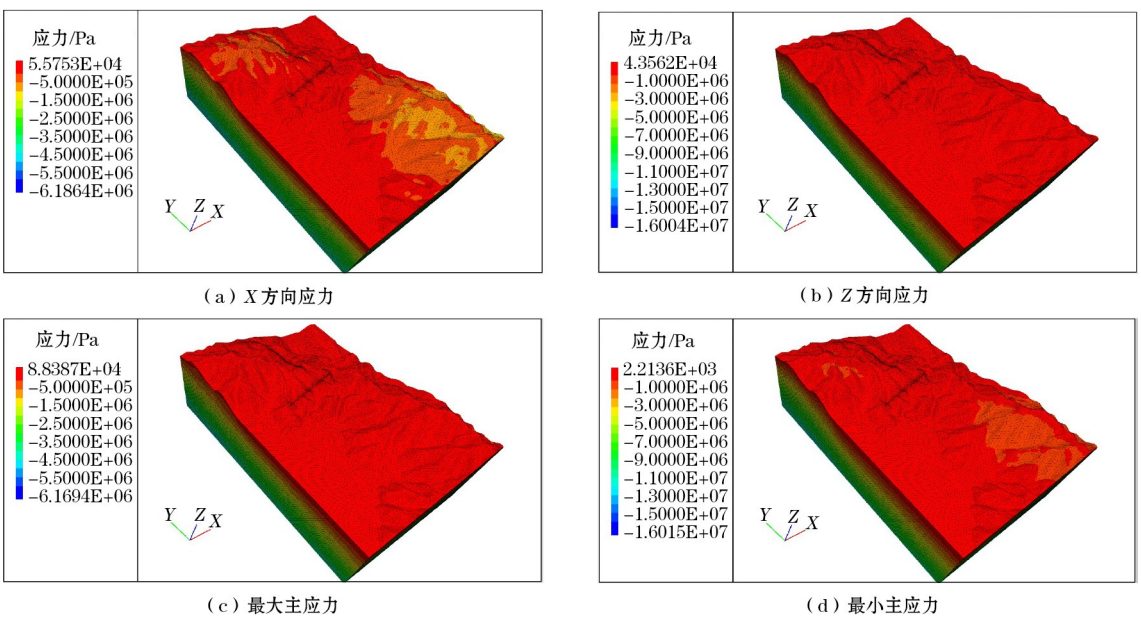


(a) X 方向应力　(b) Z 方向应力

(c) 最大主应力　(d) 最小主应力

图 7　无尾矿库模型的应力分析结果

Fig.7　Stress analysis results of the model without tailings pond



(a) X 方向应力　(b) Z 方向应力

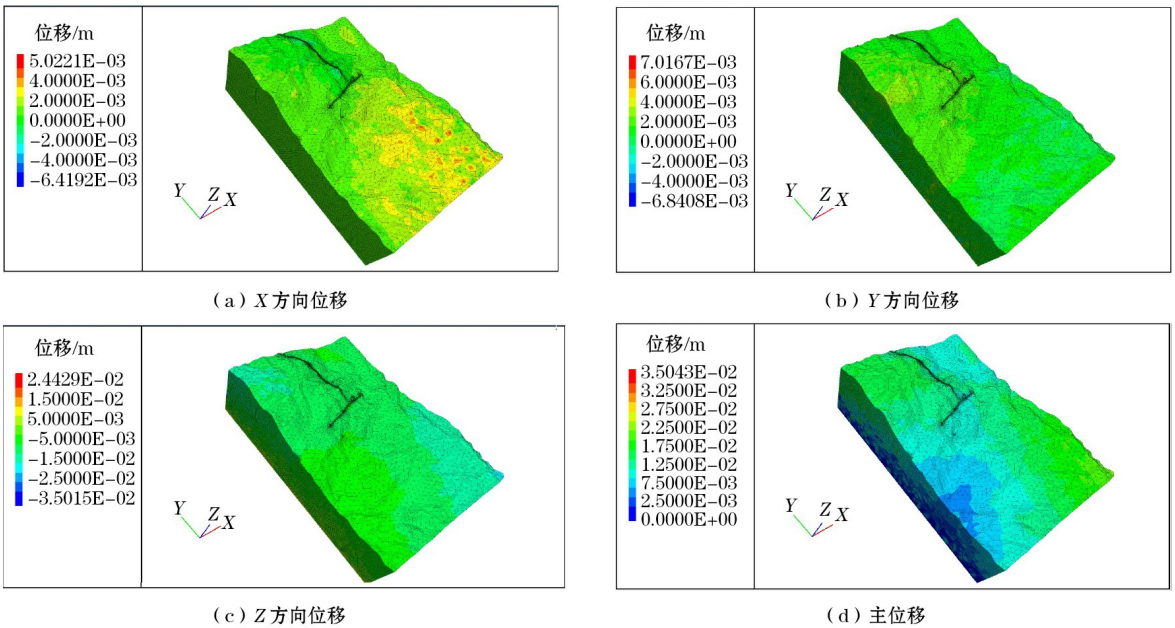
(c) 最大主应力　(d) 最小主应力

图 8　有尾矿库模型的应力分析结果

Fig.8　Stress analysis results of the model with tailings pond

4.2 位移分析

无尾矿库和有尾矿库条件下的模型位移云图分别如图 9 和图 10 所示。无尾矿库时,模型未发生较大位移,水平方向最大位移出现在尾矿库以及尾矿库与山体斜坡交界处的位置,Y 方向和 Z 方向无明显变形位移。采空区顶部发生约 15 mm 的变形位移。有尾矿库时,模型的位移集中区域仍位于尾矿库及其邻近斜坡,且采空区顶部位移减小至 14 mm。尾矿库荷载虽未改变位移集中的空间分布特征,但对采空区顶板的变形具有一定的约束作用,使其位移值轻微减小。

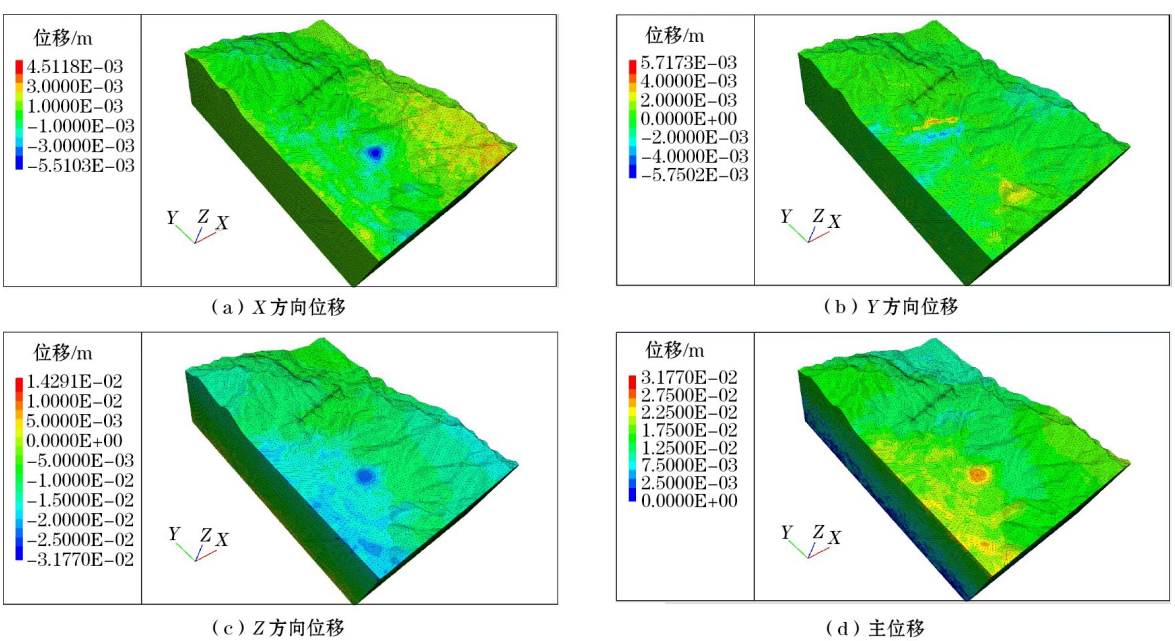


(a) X 方向位移　(b) Y 方向位移

(c) Z 方向位移　(d) 主位移

图 9　无尾矿库模型的位移分析结果

Fig.9　Displacement analysis results of the model without tailings pond



(a) X 方向位移　(b) Y 方向位移

(c) Z 方向位移　(d) 主位移

图 10　有尾矿库模型的位移分析结果

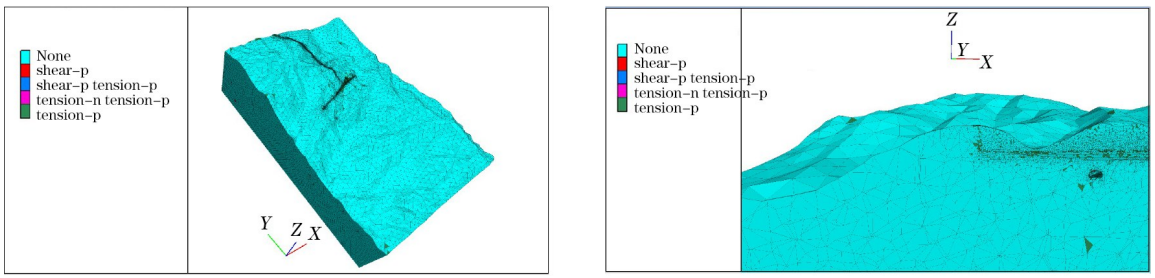
Fig.10　Displacement analysis results of the model with tailings pond

4.3 塑性区分析

无尾矿库和有尾矿库条件下的模型塑性区分布分别如图 11 和图 12 所示。塑性区主要集中于尾矿库及尾矿库与山体斜坡交界处,其原因为在

尾矿库的荷载作用下,山体斜坡地表全风化岩层发生变形,产生塑性状态。从围岩塑性区来看,矿体采空区周围均发育有一定范围的塑性区,而且在无尾矿库与有尾矿库条件下,该塑性区均未与地表贯通,表明开采活动尚未引发直达地表的塑性破坏通道。

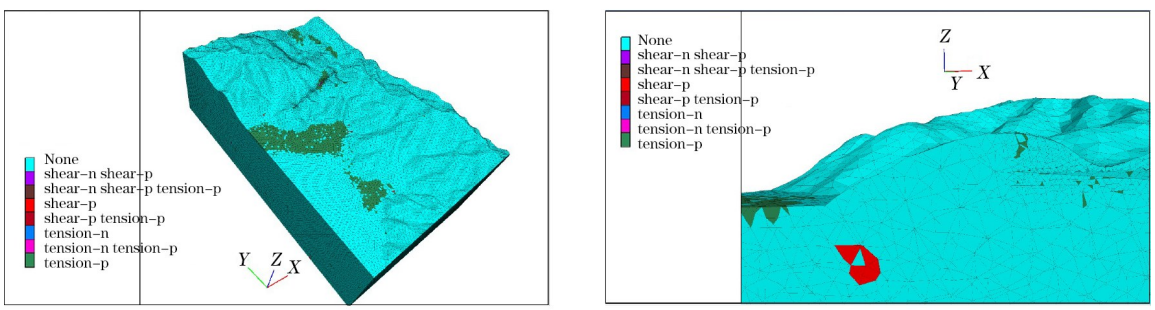
由图 12 可知,在有尾矿库的条件下,采空区周围的塑性区未与地表贯通,也未与尾矿库底部及边坡区域的塑性区相互连接。这表明在尾矿库荷载作用下,尾矿库周边产生的塑性区与井下开采引发的塑性区在空间上仍然是相互独立的。尾矿库的存在虽使地表附近岩体的塑性变形有所增加,但并未导致采空区塑性区与上部塑性区贯通,在整体上有利于维持区域岩体的整体稳定性。



(a) X方向塑性区　　(b) Z方向塑性区

图 11　无尾矿库模型的塑性区分析结果

Fig.11　Plastic zone analysis results of the model without tailings pond



(a) X方向塑性区　　(b) Z方向塑性区

图 12　有尾矿库模型的塑性区分析结果

Fig.12　Plastic zone analysis results of the model with tailings pond

通过对比有无尾矿库条件下的Ⅱ号矿体采场空区的顶部应力、上部位移变形及塑性区分布可知,有无尾矿库对Ⅱ号矿体开采的影响较小。采空区的塑性区尚未贯通到地表与尾矿库的塑性区。因此,可以判定尾矿库的存在对Ⅱ号矿体开采的影响较小,但在矿体开采过程中,仍有其他影响采空区稳定性的因素,在后期的开采过程中,可优先采用胶结充填法开采距离尾矿库较近的Ⅱ号矿体,在尾矿库排放至+220 m 之前,确保Ⅱ号矿体开采完毕,并对巷道进行封堵。

5　结论

本研究通过 GTS/NX-FLAC3D 耦合建模,对特定工况下的尾矿库-地下开采协同稳定性进行了分析,具体结论如下。

(1) 平硐封堵长度优化可有效控制尾矿库对矿山开采的影响。当封堵长度达到 105 m 时,拉应力稳定在 0.20 MPa,位移变形量为 8 mm,且封堵区域无塑性区产生。表明“封堵换空间”策略可行,为类似淹没线内硐口治理提供了定量设计依据,后续可在平硐封堵区布设位移、渗压及水位等多源监测系统进行实时监测。

(2) 尾矿库对Ⅱ号矿体开采的稳定性影响较小。对比模拟结果可知,有尾矿库在时,采空区顶板拉应力从无尾矿库的 0.87 MPa 降低至 0.84 MPa,位移由无尾矿库的 15 mm 减小至 14 mm,且采空区塑性区未与地表及尾矿库塑性区贯通。原因在于 60 m 的距离使得尾矿库荷载通过围岩应力拱效应

充分扩散,尾矿库对深部采场的扰动已衰减至工程允许范围,但建议在 60 m 影响范围内加强应力与变形监测。

(3) GTS/NX-FLAC3D 方法高效可靠,该方法能有效克服 FLAC3D 在复杂地形与结构建模中的困难,提高建模分析效率与精度。本文实践证明,该技术路径在解决"尾矿库-地下开采"协同稳定性分析问题上,提供了可行的技术途径。

(4) 本研究仅基于"静态渗流-应力"耦合分析,未考虑库水位动态变化及降雨入渗等复杂工况。未来研究可针对上述动态过程开展时空分析,并结合现场监测数据进行模型反演与验证,以建立更为完备的尾矿库区地下工程安全风险评估体系。

参考文献(References):

[1] 王连成,邵安林,曲福明,等.金属矿山开采技术发展现状与展望[J].工程科学学报,2025,47(5):971-983.
Wang Liancheng, Shao Anlin, Qu Fuming, et al. Current status and prospects of mining technology in metal mines [J].Chinese Journal of Engineering,2025,47(5):971-983.

[2] 余伟健,孙梅霖,杜锦滢,等."双碳"目标下矿山生态修复及减排增汇途径研究进展[J].矿业安全与环保,2025,52(1):38-46.
Yu Weijian, Sun Meilin, Du Jinying, et al. Research progress on approach for ecological restoration of mine, emission reduction and carbon sink under the goal of carbon peak and carbon neutrality [J]. Mining Safety & Environmental Protection,2025,52(1):38-46.

[3] 王昆,杨修志,王迪,等.尾矿坝溃坝分析模拟方法研究动态与发展趋势[J].有色金属(中英文),2025,15(8):1396-1407.
Wang Kun, Yang Xiuzhi, Wang Di, et al. Research progress and development trends of simulation methods for tailings dam breach analysis[J].Nonferrous Metals,2025,15(8):1396-1407.

[4] 袁平,熊谦,方超,等.小麻柳尾矿库 2 号拦泥坝工作性态及稳定安全性分析[J].武汉大学学报(工学版),2022,55(2):123-130+152.
Yuan Ping, Xiong Qian, Fang Chao, et al. Analysis of the working state and stability safety of No. 2 mud dam in Xiaomaliu tailing pond[J]. Engineering Journal of Wuhan University,2022,55(2):123-130+152.

[5] 杨春和,张超,李全明,等.大型高尾矿坝灾变机制与防控方法[J].岩土力学,2021,42(1):1-17.
Yang Chunhe, Zhang Chao, Li Quanming, et al. Disaster mechanism and prevention methods of large-scale high tailings dam[J].Rock and Soil Mechanics,2021,42(1):1-17.

[6] 袁朝.尾矿库淹没排土场条件下相互影响关系及稳定性研究[J].中国矿山工程,2025,54(3):64-69+95.
Yuan Chao. Study on the mutual influence relationship and stability under the condition of submerged tailings pond and waste disposal site[J].China Mine Engineering,2025,54(3):64-69+95.

[7] 梁冰,曾勇,易富,等.尾矿坝渗流稳定性研究进展[J].长江科学院院报,2025,42(3):107-117.
Liang Bing, Zeng Yong, Yi Fu, et al. Advances in research of seepage stability of tailings dams [J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute,2025,42(3):107-117.

[8] 高鹏飞,高涛,史夏杰,等.基于排土场-尾矿库联建系统主要影响因素的稳定性分析研究[J].中国安全生产科学技术,2025,21(11):107-113.
Gao Pengfei, Gao Tao, Shi Xiajie, et al. Stability analysis based on the main influencing factors of waste dump-tailings pond joint construction system[J].Journal of Safety Science and Technology,2025,21(11):107-113.

[9] 宋志飞,吴文祥,尤洋,等.不同降雨条件下尾矿坝稳定性的研究[J].矿业研究与开发,2025,45(11):184-190.
Song Zhifei, Wu Wenxiang, You Yang, et al. Research on the stability of tailings dam different rainfall conditions[J]. Mining Research and Development,2025,45(11):184-190.

[10] 刘红岩,刘康琦,周月智,等.尾矿库渗流场及坝体稳定性的三维数值分析[J].矿业研究与开发,2023,43(11):129-136.
Liu Hongyan, Liu Kangqi, Zhou Yuezhi, et al. Three-dimensional numerical analysis of the seepage field of the tailings reservoir and stability of the tailings dam[J].Mining Research and Development,2023,43(11):129-136.

[11] 琚海桥,符电闪,李曦阳,等.复杂地形条件下某高堆坝尾矿库三维渗流模拟及稳定分析[J].现代矿业,2025,41(7):145-149.
Ju Haiqiao, Fu Dianshan, Li Xiyang, et al. Three-dimensional seepage simulation and stability analysis of a high dam tailings reservoir under complex terrain conditions [J].Modern Mining,2025,41(7):145-149.

[12] 邓红卫,李爽,邓峻仁.渗流-应力耦合作用下尾矿库稳定性的三维数值分析[J].安全与环境学报,2016,16(4):133-138.
Deng Hongwei, Li Shuang, Deng Junren. 3D-numerical simulation on the stability of tailings dam under the coupled stress and seepage fields [J]. Journal of Safety and Environment,2016,16(4):133-138.

[13] 范博文,王穗丰,蔡晓斌,等.基于 FLAC3D 磷石膏尾矿库液化特征分析[J].武汉大学学报(工学版),2025,58(2):182-188.
Fan Bowen, Wang Suifeng, Cai Xiaobin, et al. Liquefaction characteristics analysis of phosphogypsum tailings pond based on FLAC3D [J]. Engineering Journal of Wuhan University,2025,58(2):182-188.

[14] 蒋京名,郭家能,王志.尾矿库下压覆矿体开采对尾矿库及坝体影响分析[J].金属矿山,2021(4):191-196.

Jiang Jingming, Guo Jianeng, Wang Zhi. Analysis of tailing pond and dam body in mining of the overlying orebody under tailing pond[J].Metal Mine,2021(4):191-196.

[15] 黄世顶,刘尧,邓红卫,等.基于修正 Mathews 稳定图法与 FLAC3D 的采场结构参数优化研究[J].矿业研究与开发,2024,44(4):10-18.
Huang Shiding, Liu Yao, Deng Hongwei, et al. Optimization of stope structural parameters based on modified Mathews stability diagram method and FLAC3D [J].Mining Research and Development,2024,44(4):10-18.

[16] 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.
Ye Haiwang, Deng Bijun, Chen Dongfang. Quantitative evaluation of instability probability of graphite ore goaf based on RSM-FLAC [J]. Mining Research and Development,2025,45(1):112-119.

[17] 王飞飞,田春艳,任青阳,等.地下复杂采空区引起地表塌陷渐进发展过程数值模拟研究[J].矿冶工程,2020,40(6):22-25+29.
Wang Feifei, Tian Chunyan, Ren Qingyang, et al. Numerical simulation of progressive development process of surface subsidence caused by underground complex goaf[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2020, 40(6): 22-25+29.

[18] 许玉军,马立强,王磊,等.基于 FLAC3D-COMSOL 耦合的采动覆岩渗流演化及展布仿真实验[J].实验技术与管理,2025,42(1):123-132.
Xu Yujun, Ma Liqiang, Wang Lei, et al. Simulation experiment on mining-induced permeability evaluation and distribution in overlying strata based on FLAC3D-COMSOL coupling[J]. Experimental Technology and Management, 2025,42(1):123-132.