

基于MatDEM的露天转地下充填法开采中采场与边坡稳定性的影响研究

徐孟超^{1,2}, 王运敏^{3,4}, 李小双^{1,5*}

1. 常州大学城市建设学院, 江苏 常州 213164;
2. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护全国重点实验室, 四川 成都 610059;
3. 金属矿山开采安全与灾害防治全国重点实验室, 安徽 马鞍山 243000;
4. 中钢集团马鞍山矿山研究院股份有限公司, 安徽 马鞍山 243000;
5. 齐鲁理工学院, 山东 济南 250200



摘要:为了系统地探讨地下矿山开采扰动下,不同坡角的高陡岩质边坡稳定性,采场顶板和覆岩变形破坏特征及其动态演化规律。以昆阳磷矿二矿露天转地下充填法开采作为研究对象,采用现场勘查、室内岩石力学试验与MatDEM离散元软件相结合的方法,建立了不同坡角下的200 m高陡边坡模型,研究了35°、45°和55°这3种坡角下边坡的岩体应力和位移变化特征,地下采场应力和位移的变化规律,以及充填法开采对边坡变形破坏的影响规律。研究表明:露天转地下充填法开采过程中位移和应力是一个动态变化的过程,采场覆岩形成了椭圆形的沉降区域,且随着开采过程的推进,椭圆形的沉降范围发生动态变化。采场顶板的应力变化主要经历了应力重分布、应力集中、充填压力调整和应力平衡4个阶段。由于受采动效应的影响,露天边坡坡腰产生小范围的变形破坏与沉降,应力先降低后增加。采场覆岩和顶板均呈现边坡坡角越大,位移沉降范围和应力变化区间越大的规律。研究结果可为相似地下矿山开采方式选择提供借鉴。

关键词:充填采矿法;采场覆岩;MatDEM;动态变化;变形破坏;沉降区域

中图分类号:TD871 文献标志码:A 文章编号:1005-2518(2025)06-1139-16 DOI:10.11872/j.issn.1005-2518.2025.06.166
引用格式:徐孟超,王运敏,李小双.基于MatDEM的露天转地下充填法开采中采场与边坡稳定性的影响研究[J].黄金科学技术,2025,33(6):1139-1154.XU Mengchao, WANG Yunmin, LI Xiaoshuang.Study on the Impact of Open-pit to Underground Filling Mining on Stope and Slope Stability Based on MatDEM[J].Gold Science and Technology,2025,33(6):1139-1154.

露天矿山经过几十年持续高强度的开采,大多数已进入深凹开采阶段或地下开采阶段(Xue et al, 2023)。露天矿山进入深凹开采阶段后,边坡高度

持续增大,采矿运输距离显著增加,边坡安全系数降低,开采成本不断攀升,致使露天开采的多重优势逐渐丧失,综合效益显著下降(李小双等,2019)。

收稿日期:2025-05-15;修订日期:2025-08-19

基金项目:国家自然科学基金项目“干湿交替—爆破振动耦合下含空区高陡岩体坡力学响应特征及其失稳机理研究”(编号:42277154)、“干湿—冷热—循环载荷耦合下高陡岩质边坡裂隙岩体的疲劳失稳机理研究”(编号:42477142)、云南省中央引导地方科技发展项目“重要生态敏感区磷矿山固废充填保水绿色开采技术应用研究”(编号:202407AC110019)、贵州省科技计划项目“复杂环境应力下难采磷矿露天转地下开采岩体响应特征研究”(编号:黔科合支撑[2022]一般229)、山东省高等学校“青创人才引育计划”边坡安全管控与灾害预防技术创新团队项目(编号:鲁教科函[2021]51号)、山东省自然科学基金项目“露井复合采动下岩体响应的演化特征及其破坏机制研究”(编号:ZR2022ME188)、济南市“新高校20条”科研带头人工作室项目“干湿交替—爆破振动耦合作用下含高陡岩质边坡力学响应特征及其致灾机制研究”(编号:20228108)和常州大学高层次人才引进项目“降雨入渗与露井复合采动耦合作用下高陡岩质边坡岩体响应的演化特征及其致灾机制研究”(编号:ZMF24020037)联合资助

作者简介:徐孟超(1997—),男,河南驻马店人,博士研究生,从事岩石力学方面的研究工作。E-mail:2750690437@qq.com

***通信作者:**李小双(1983—),男,湖北随州人,教授,从事边坡工程方面的研究工作。E-mail:xsl2011@cczu.edu.cn

© Editorial Department of Gold Science and Technology (CC BY-NC-ND)

这些因素迫使露天矿逐步由深凹开采阶段转入地下开采阶段,在此过程中,地下采场覆岩及其顶板的非线性变形给矿山地压管理和生产安全带来了严峻挑战,因此研究露天转地下开采过程中的采场和边坡稳定性具有重要意义。

国内学者对地下矿山充填法开采进行了大量研究,在地下开采阶段初期重点围绕充填体强度演化特征(Behera et al, 2023),采场结构参数优化设计(梅林芳等, 2025),地下开采方案适应性(陈霖等, 2022;王雄雄等, 2024),充填法开采隔离矿柱合理厚度(Qin et al, 2021),以及充填体类型的非协调应力响应机制(王平等, 2024)等方面进行了研究。随着地下开采深度的增加,充填方法的选择对地下矿山开采越来越重要,合适的充填方法不仅能增加采场的稳定性,而且能增加矿山开采的效益。因此,研究人员开始对不同充填方法进行研究,包括空场嗣后充填法(胡超等, 2021;郭良银等, 2022)、上向分层充填采矿法(罗瑞等, 2019;郝英杰等, 2023)、下向分层充填采矿法(谭宝会等, 2021;张志贵等, 2021)和伪倾斜分段条带进路充填采矿法(程东旭等, 2025),研究内容集中在充填体对围岩应力和位移变化规律的影响(骆欢等, 2024),充填法开采对覆岩移动和地表变形规律的研究(Li et al, 2022;贾林刚等, 2022;Li et al, 2023),以及充填法开采对高陡露天边坡稳定性的影响(Liu et al, 2019)。采用室内岩石力学试验、理论数值计算、相似模拟试验和数值模拟试验等方法,对矿山充填开采进行研究(王孟来等, 2022;徐孟超, 2024)。充填开采的研究对象大多数集中在急倾斜厚大矿体上,对缓倾斜薄至中厚含软弱夹层非金属矿山的的研究较少。在充填法开采过程中,离散元能够通过颗粒间的接触和相对运动来模拟充填体与围岩之间的相互作用、岩体内部裂隙的扩展等现象,前人对露天转充填法的研究大多采用有限元分析(梁冰等, 2022),采用DEM离散元分析的研究相对较少。

由于非金属矿山的地质状况和开采环境的特殊性,有关充填法开采扰动下露天终了边坡与地下采场顶板及覆岩相互作用机理研究较少,且大多数研究只针对地下开采采场方面,很少涉及整个露天转地下系统。因此,以云南昆阳磷矿二矿露天转地

下开采作为研究对象,采用MatDEM数值模拟软件与室内岩石力学试验相结合的方法,建立了坡高为200 m,坡角分别为35°、45°和55°的矿山充填法开采模型,获取地下采场顶板、覆岩以及边坡监测点应力一位移变化曲线,分析露天转地下充填法开采过程中不同边坡坡角的采场顶板、覆岩的动态演化特征以及边坡变形破坏特征。

1 工程地质概况

昆阳磷矿二矿位于滇池聚磷区南西部,东邻昆阳磷矿(一采区至四采区),西接肖家营磷矿,北部为海口磷矿,位于晋宁区二街镇境内,昆阳磷矿二矿的地理位置及露天开采现场如图1所示。根据现场地质勘察报告及钻孔数据,矿层属于典型的缓倾斜薄至中厚含软弱夹层的矿体,矿体间软弱夹层厚度为1.08 m,矿层倾角约为15°,磷块岩属于二类至四类岩体。矿层地层主要为粉砂岩、页岩、砂岩、顶板白云岩、磷块岩、矿体间夹层和底板白云岩。

2 室内岩石力学试验

从昆阳磷矿二矿现场选取了形状各异且节理发育程度不同的矿石样本,进行了室内岩石力学试验。以白云岩为例,按照试验标准,将进行巴西劈裂试验的白云岩打磨成高度为25 mm、半径为50 mm的圆柱体试样,将进行单轴和三轴压缩试验的白云岩打磨成高度为100 mm、直径为50 mm的标准圆柱体试样,试样的尺寸误差控制在2 mm之内,试样表面平整度控制在2 mm之内。室内岩石力学试验仪器主要由计算机控制中枢、高压三轴压力室及多源传感单元构成有机整体(图2)。计算机控制系统作为核心驱动单元,统筹管理轴向加载模式(位移或荷载控制)与围压加载过程,同步实现应力一位移曲线的动态可视化及全周期数据存储。刚性三轴压力室通过高强度合金钢腔体与密封系统构建封闭应力环境,容纳试样并施加可控围压场。变形监测单元包含直接测量轴向应变的电子引伸计和捕获径向应变的环向链式引伸计,环向链式引伸计通过360°包覆结构解析体积应变演化;应力监测单元则依靠压力室内置荷载传感器消除系统误差获

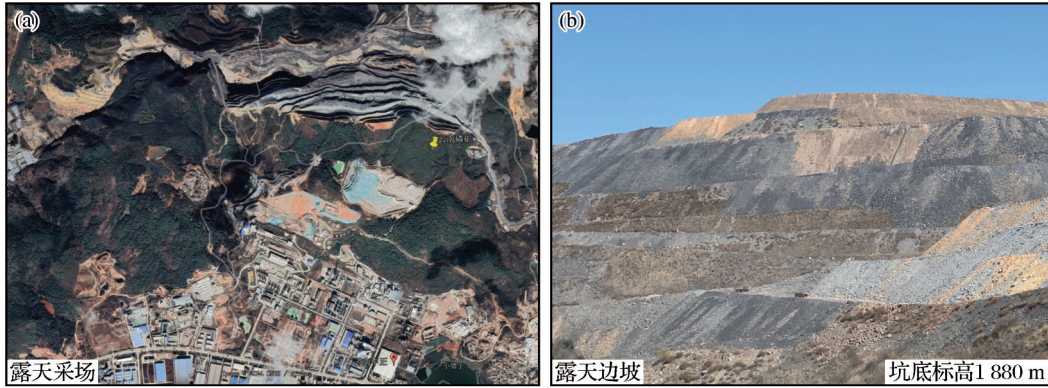


图1 露天矿山采场终了边坡概况图

Fig. 1 Overview map of the final slope of open-pit mine stope

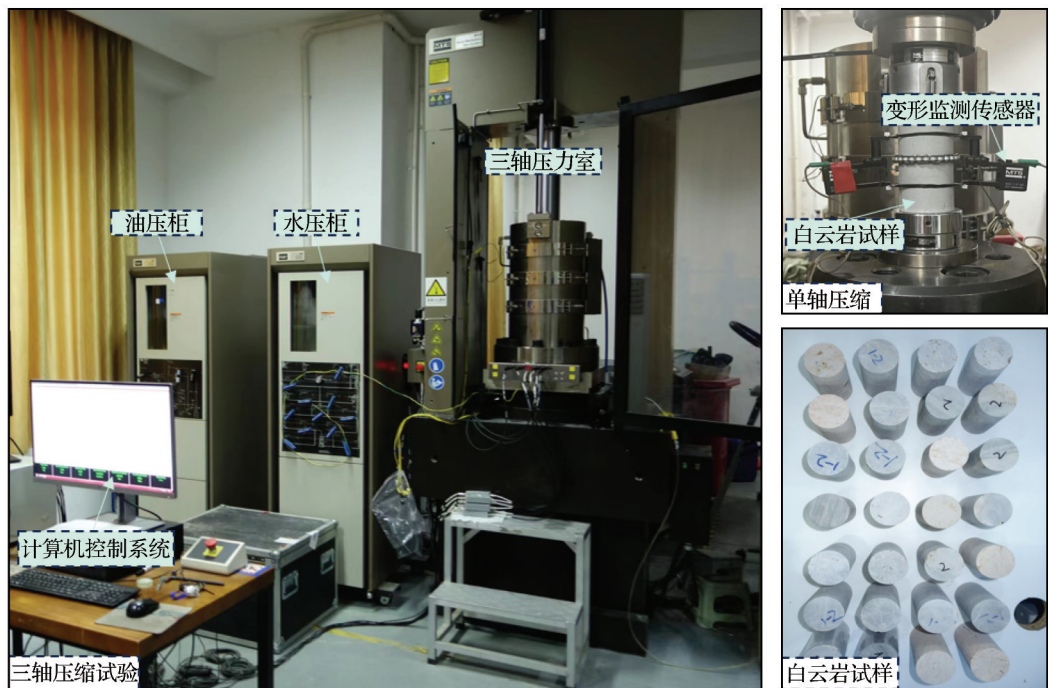


图2 岩石力学试验设备及试样示意图

Fig. 2 Schematic diagram of rock mechanics test equipments and samples

取真实轴力,配合围压传感器实现腔体压力闭环反馈。各组件协同形成从荷载施加、环境模拟到参量采集的完整监测链。

试验采用改进的Hoek-Brown强度准则对岩石力学参数进行弱化,弱化后的岩石力学参数如表1所示。其中,Hoek-Brown计算公式可表示为

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^a \quad (1)$$

其中, m, s, a 的计算公式为

$$\begin{cases} m = m_i \exp\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right) \\ s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right) \\ a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right) \end{cases} \quad (2)$$

式中: GSI 为地质强度指标,白云岩取 37; σ_1 为破坏时最大主应力; σ_3 为破坏时最小主应力; σ_c 为单轴抗压强度; m 和 s 为岩体材料常数; D 为岩体的扰动参数,取值为 0~1,未受扰动岩体 $D=0$; a 为岩体的破

表1 弱化后的岩石力学参数取值
Table 1 Value of rock mechanics parameters after weakening

岩性	密度/(g·cm ⁻³)	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
粉砂岩	2.64	0.23	3.32	0.28	0.21	31.9
页岩	2.66	0.22	3.65	0.24	0.24	34.9
砂岩	2.72	0.22	7.13	0.24	0.22	36.9
白云岩	2.75	0.14	5.02	0.27	0.13	32.8
磷块岩	2.79	0.25	6.02	0.27	0.24	34.6
矿体间夹层	2.60	0.12	2.05	0.27	0.10	28.0
底板白云岩	2.78	0.30	6.03	0.26	0.27	33.0

碎程度,取值为0.00022; m_i 为常数,可通过室内岩石力学试验结果来确定。

为了更加真实准确地描述地下矿山各个地层的岩石力学参数,利用转换公式可自动训练室内岩石力学试验获得的岩石力学参数,MatDEM离散元软件宏微观之间的力学转换公式为

$$\begin{cases} K_n = \frac{\sqrt{2} Ed}{4(1-2\nu)} \\ K_s = \frac{\sqrt{2} (1-5\nu) Ed}{4(1+\nu)(1-2\nu)} \\ X_b = \frac{3K_n + K_s}{6\sqrt{2} K_n (K_n + K_s)} T_u d^2 \\ F_{s0} = \frac{1-\sqrt{2} \mu_p}{6} C_u d^2 \\ \mu_p = \frac{-2\sqrt{2} + \sqrt{2} I}{2+2I}, I = \left[(1+\mu^2)^{1/2} + \mu_i \right]^2 \end{cases} \quad (3)$$

式中: E 为杨氏模量; ν 为泊松比; C_u 为抗压强度; T_u 为抗拉强度; μ_i 为内摩擦系数; d 为直径; K_n 为法向刚度; X_b 为断裂位移; K_s 为切向刚度; F_{s0} 为颗粒间的抗剪力; μ_p 为颗粒间的摩擦系数。

3 开采方案研究

3.1 隔离矿柱厚度

在露天转地下开采过程中,隔离矿柱与境界矿柱的厚度设计须满足全生命周期承载需求,其结构完整性直接关联地下采场系统的长期稳定性,隔离顶柱和境界矿柱的稳定性能最大程度地保障工程的安全性(Kumar et al, 2017)。根据各类隔离矿柱宽度的计算方法,结合昆阳磷矿二矿的工程地质背景与具体计算参数,选用K.B.鲁佩涅伊特公式

(秦予辉等,2010)计算隔离矿柱尺寸,表示为

$$h = K \frac{0.25\gamma L^2 + (\gamma^2 L^2 + 800\sigma_B g)^{1/2}}{98\sigma_B} \quad (4)$$

式中: h 为安全矿柱厚度(m); K 为安全系数,取值为1.21; γ 为顶板岩石体重,取值为2.78 t/m³; L 为采空区跨度; σ_B 为弯曲条件下考虑到强度安全系数, $\sigma_B = \frac{\sigma_{n3}}{K_0 K_3}$; K_3 为结构削弱系数, $K_3 = 7 \sim 10$; K_0 为顶板强度极限(MPa), $K_0 = 2 \sim 3$; σ_{n3} 为弯曲条件下的岩石强度极限,取值范围为0.07~0.10 σ_c , $\sigma_{n3} = (7\% \sim 10\%) \sigma_c$; σ_c 为岩体单轴抗压强度,取值为38.0 MPa; g 为电铲及其他设备对顶板的压力,取值为0.3 MPa, $g = \frac{G}{bL}$; G 为顶板自重和顶板上覆覆盖层的重量; b 为顶板横截面的宽度。

经过理论计算得出隔离矿柱安全取值范围为12.90~39.40 m,因此,昆阳磷矿二矿充填法开采过程中,初步设计预留15 m隔离矿柱,具有一定的合理性。

3.2 充填体强度

根据昆阳磷矿二矿的开采技术条件和采场结构系数,为了最大限度地回采矿体,采用全尾砂胶结充填体作为支撑矿柱,从而提高矿体的稳定性,并保障采矿作业的安全性。充填体的强度主要通过工程类比和理论计算方法(卢平法和蔡嗣经经验公式)获得,卢平法(王东华,2012)和蔡嗣经经验公式(魏晓明等,2020)的计算过程分述如下。

(1) 工程类比法

工程类比法的核心是参考国内与昆阳磷矿二矿具有相似采场参数所选取的胶结充填体强度(王社光等,2023;李再易等,2024)。统计国内相关地

下矿山采用胶结充填法开采得到的充填体强度,如表2所示。

表2中的胶结充填体强度为养护28 d后的强度值,由于各矿山的实际开采方法和地质状况不

同,由表2可以看出,采场结构参数相近的矿山实际使用的胶结充填体的设计强度相差较小,参考以上几个矿山的充填体强度,大致确定昆阳磷矿二矿地下矿山的充填体强度范围为1~4 MPa。

表2 胶结充填体强度
Table 2 Strength of cemented backfill

矿山名称	高度/m	长度/m	矿房宽度(矿柱宽度)/m	采用方法	水泥/%	充填体强度	
						养护/d	强度值/MPa
凡口铅锌矿	40	35	7~10(4~8)	经验类比法	11.0	28	2.5
冬瓜山铜矿	35	82	18	经验类比法	10.0	28	3.5
金川镍矿	60	51	50	经验类比法	9.5	28	2.5
云南锡矿	18~36	20~30	10(8)	工程分析法	10.0	28	4.0
新城金矿	40	20~30	8(7)	经验类比法	8.0	28	1.5
柏坊铜矿	30	15	4~8(4~6)	经验类比法	10.0	28	4.0
安庆铜矿	120	60~00	15(15)	经验类比法	10.0	28	1.26~4.73
李楼铁矿	100	25.5~96.5	20(20)	覆盖岩层理论	10.0	28	2.15

(2) 卢平法

卢平于1987年在Thomas计算法的基础上,提出了修正模型,进一步改进了该算式,拓展了Thomas算式的适用范围,卢平法的计算公式为

$$\sigma_v = \frac{\gamma \cdot H}{\sin \beta \left(\tan \varphi + \frac{2H}{B} \times \frac{C_1}{C} \sin a \right)} \quad (5)$$

式中: σ_v 为充填体底部中间受到的垂直应力(MPa); γ 为充填体容重(kN/m³); H 为充填体的高度(m); B 为充填体的宽度(m); a 为平面破坏角, $a=45^\circ + \beta/2$; C 为充填体内聚力(MPa); C_1 为充填体与围岩的内聚力(MPa); β 为充填体内摩擦角($^\circ$); φ 为矿体内摩擦角($^\circ$)。

(3) 蔡嗣经经验公式法

蔡嗣经调查了国内外矿山胶结充填体的强度情况,并进行了归纳整理,得到了矿山胶结充填体强度与充填体高度的关系曲线,蔡嗣经经验公式可表示为

$$H^2 = a\sigma_c^3 \quad (6)$$

式中: σ_c 为胶结充填体设计强度(MPa); H 为充填体高度(m); a 为系数,当充填体高度小于50 m时,取值为6 000。

昆阳磷矿二矿采场结构参数为200 m×15 m×15 m,即充填体的高度 $H=15$ m,宽度 $B=15$ m,长度 $L=200$ m,选取的充填体容重 $\gamma=19.1$ kN/m³,内摩擦

角 $\beta=35^\circ$,黏聚力 $C=0.2$ MPa。矿体的内摩擦角 $\varphi=32.39^\circ$,黏聚力 $C_1=0.157$ MPa。

根据卢平法和蔡嗣经经验公式得到的充填体强度分别为0.2245 MPa和0.335 MPa。同时,结合工程类比法可知国内的胶结充填体强度为1~4 MPa。为了最大化地保障地下矿山的生产安全性,考虑到磷矿层顶板白云岩厚度仅为2.8 m,存在顶板坍塌及冒落等潜在风险,因此,将充填体强度提升至1.8 MPa,能够有效满足矿山生产过程中的安全需求。

3.3 开采方案

根据以往矿山地下开采的经验,采用充填法开采方案预留15 m的境界矿柱,然后沿矿体倾向依次划分矿房矿柱,每划分矿房15 m,留设15 m的连续矿柱进行采场支护。将整个开采区域划分为2个开采阶段,包括6个矿房和7个矿柱,分别为矿房#1、矿房#2、矿房#3、矿房#4、矿房#5和矿房#6,矿柱分别为矿柱#1、矿柱#2、矿柱#3、矿柱#4、矿柱#5、矿柱#6和矿柱#7。相邻开采阶段的矿柱间隔设定为15 m,矿房回采顺序采用“隔一采一”的方法。矿房回采充填阶段如下:第一阶段回采充填矿房#1、矿房#2和矿房#3,第二阶段回采充填矿房#4、矿房#5和矿房#6。矿柱一阶段和二阶段回采充填顺序与矿房回采充填保持一致,矿房和矿柱的回采充填阶段如图3所示。

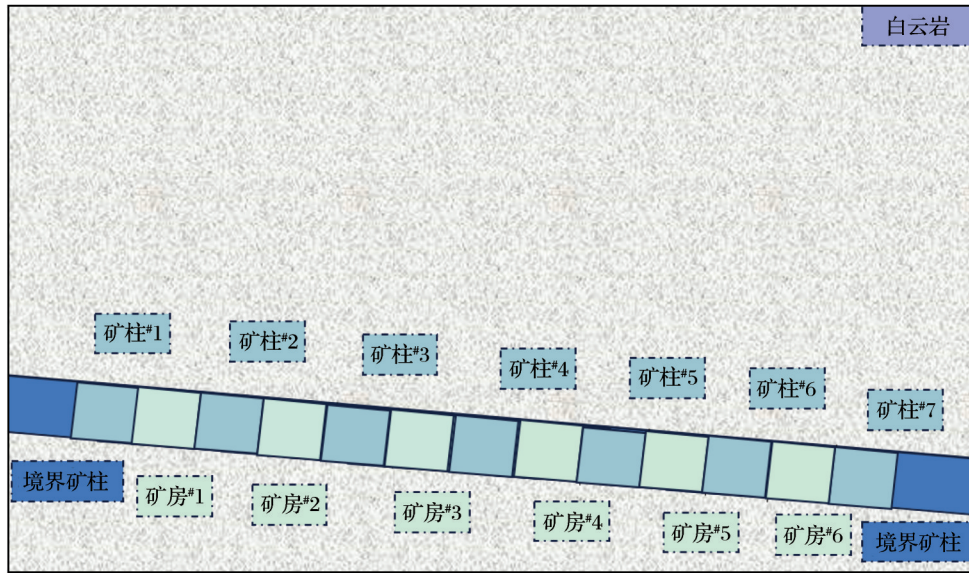


图3 地下回采充填顺序示意图

Fig. 3 Schematic diagram of underground mining and filling sequence

3.4 监测点布置情况

为了准确地记录充填采矿法开采后采场顶板和覆岩的位移、应力变化情况,在采场直接顶板白云岩内布置了25个水平监测点,以便随时观察采场顶板的离层、冒落和垮落现象。同时,在每个矿房和矿柱垂直方向上分别布置6个监测点,共布置36个监测点,以便随时观测覆岩的沉降现象。此外,为便于观察边坡的位移和应力变化,分别在边坡最易发生变形破坏的坡顶、坡腰和坡底布置了3个监测点,以便随时监测边坡动态变化,监测点的布置情况如图4所示。

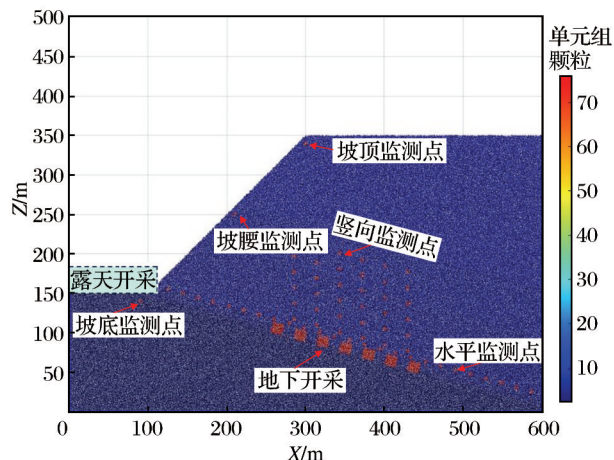


图4 监测点布置

Fig. 4 Layout of monitoring points

4 岩体应力变化规律

4.1 露天开采应力变化

由初始状态下的岩体应力分布(图5)可知,岩土体应力受拉为正,受压为负,在初始状态系下,岩体的垂直方向和水平方向的初始应力均与埋深成正比,随着埋深的增加应力逐渐增大,岩体颗粒颜色由应力为0 Pa时的红色逐渐向黄色和蓝色递进,符合自然状态下岩土体的力学规律。图6所示为露天开采结束后的应力分布,从图中可以看出,随着深度的增加应力也在增大,露天开采结束后坡腰和坡角处的应力变化幅度最大,出现了“卸荷”现象。

4.2 覆岩应力变化特征

图7中的应力集中区域采用白色虚线重点标记,通过分析一阶段和二阶段矿房回采充填过程中的应力分布可知,一阶段矿房回采过程中顶板没有出现应力集中现象,但是充填之后,充填体上方出现了明显的应力集中现象。随着回采工作面的推进,二阶段充填体上方及底部的应力集中现象越来越明显,矿房采空区底部的卸荷现象也更加明显,应力集中范围逐渐变大,但是未形成应力集中连通区域。当矿房全部充填后,采场上方的覆岩应力经过重分布之后逐渐达到一个平衡状态,应力集中现象明显下降。由于图文版面的限制,此处仅展示部

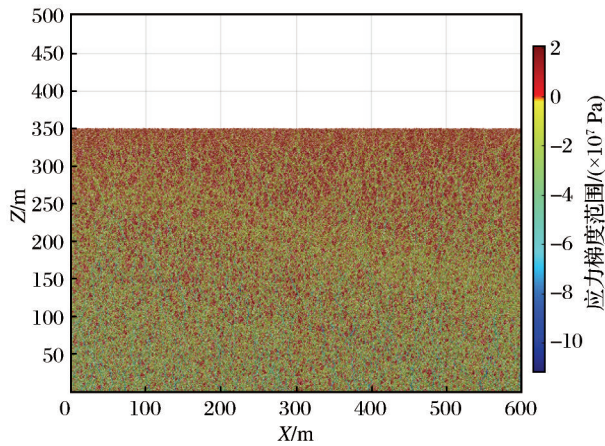


图5 初始状态下原岩应力分布

Fig. 5 Stress distribution of original rock under initial state

分矿房回采充填过程中的应力分布图,位移图也是如此。

通过分析一阶段和二阶段矿柱回采充填过程中的应力分布(图8)可知,一阶段矿柱回采充填后,打破了矿房回采充填阶段已形成的应力平衡状态,引发二次应力扰动,导致应力场再次发生重分布,应力集中区域的范围明显扩大,其空间分布特征(图8中白色虚线标记的范围)也随之向外扩展,反映出采动影响范围在原有平衡的基础上进一步延伸。二阶段充填后,充填体上方的局部应力集中区域逐渐向整个采场扩大,覆岩裂隙带内应力集中区域发生渐进式连通,并形成了显著的覆岩应力集中区域,覆岩应力影响范围逐步扩展,并最终波及地表岩土层及邻近边坡区域,对地表沉降变形与边坡

稳定性构成潜在影响。

矿房矿柱回采充填完成后,通过对比3种坡角应力分布可知,3种坡角均出现了应力集中现象,坡角为 55° 时覆岩应力集中现象更加明显,范围更大,且在充填完成后,应力集中范围波及至地表和边坡区域,其次是坡角为 45° 时和坡角为 35° 时应力集中范围最小,说明露天开采坡角越大对地下采场和覆岩回采充填的影响越大。

4.3 采场应力变化规律

由图9和图10可知,矿房一阶段回采充填过程中,坡角为 35° 、 45° 和 55° 的应力值分别由8.38, 9.31, 9.45 MPa减少至0.19, 0.20, 0.34 MPa,然后再逐渐增加至16.72, 16.75, 17.11 MPa,最后逐渐稳定于11.86, 12.03, 12.4 MPa;二阶段回采充填过程中,坡角为 35° 、 45° 和 55° 的应力值由6.76, 8.43, 9.42 MPa减少至0.07, 0.20, 0.42 MPa,再逐渐增加至16.57, 17.84, 17.98 MPa。矿柱一阶段回采充填的应力值逐渐稳定在13.17, 14.93, 19.73 MPa,二阶段回采充填的应力值稳定在13.48, 16.46, 18.13 MPa。其主要原因是:回采过程中导致局部区域的应力释放,矿房顶板应力逐渐增大,矿体周围的岩层会经历应力重新分布,矿柱或覆岩会发生应力集中现象,随着充填体的加入,周围岩层的应力进一步分布和调整。充填之后,岩层的裂缝可能会部分闭合或发生压实,进一步缓解原有的应力集中,周围岩层的应力会趋于稳定,应力值降低,并逐渐达到一个新的应力平衡状态,因此顶板应力会出现先增加后减小、再增加再减少的变化趋势。

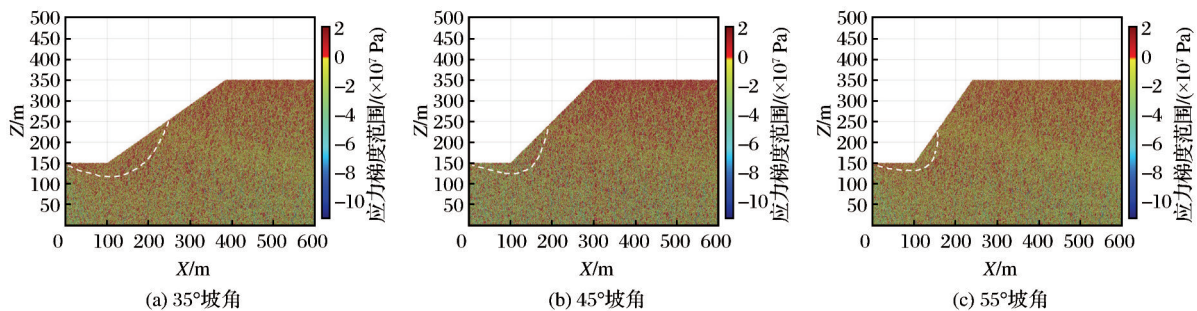


图6 露天开采结束后应力分布

Fig. 6 Stress distribution after the end of open-pit mining

二阶段矿柱回采充填过程中,当采场覆岩的岩体结构稳定性较差,覆岩变形率较大时,采场顶板不会产生附加应力,覆岩应力在回采时得到释放,

在这种情况下,采场顶板发生片帮、离层和冒落等现象,采空区顶板发生沉降,应力值出现波谷(Tian et al, 2024)。当采场覆岩的稳定性较好时,采空区

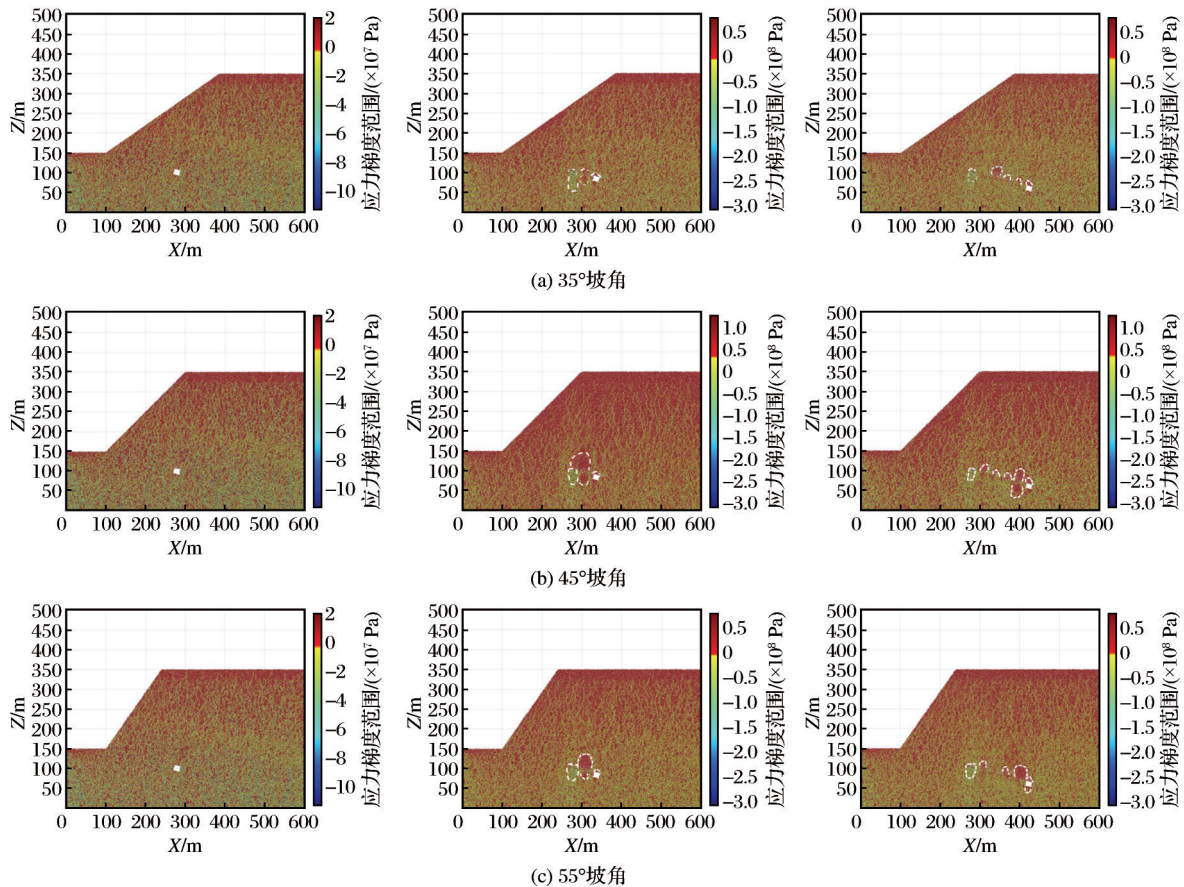


图7 一阶段和二阶段矿房回采充填应力分布

Fig. 7 Stress distribution of mining and filling in the first and second stage mine rooms

顶板沉降量较小,应力主要集中在两侧的充填体或未回采的矿柱上,应力值会出现波峰。充填法开采过程中岩体的应力变化是一个动态的过程,可以将岩体应力变化划分为4个阶段,分别是开采初期的应力释放阶段、应力集中阶段、应力传递阶段和应力平衡阶段。

5 岩体移动变形破坏规律

5.1 露天开采位移变化

当露天开采之后,MatDEM离散元软件规定岩体向下沉降的位移量为负,岩体向上隆起的位移量为正。由图11可知,露天边坡岩体被开挖之后,3种模型坡腰和坡脚均出现向上隆起的现象。同时,由图11可以看出,坡脚处的位移变化量最大,且影响范围更大,说明在岩体开挖之后,坡角与位移移动范围呈负相关关系。

5.2 覆岩变形破坏特征

覆岩沉降和边坡变形破坏区域采用白色虚线重点标记,通过分析一阶段和二阶段矿房回采充填后位移演化图(图12)可知,矿房采空区顶板受到压一剪应力作用发生不均匀沉降,并出现少量的裂隙和顶板岩体碎屑掉落,矿房底部和两侧受到拉一压应力作用向内侧凸起,侧壁出现少量的脱落。随着工作面的推进,矿房顶板的沉降现象进一步扩展至覆岩,当矿房充填后,覆岩沉降量有所降低并逐渐趋于稳定,并未形成较大范围的覆岩沉降区域。

由图13可知,一阶段和二阶段矿柱回采后,在压一剪复合应力状态下矿柱采空区顶板和两侧支撑局部区域发生渐进式压裂与剥落破坏,底部卸荷程度进一步加剧。随着矿柱回采充填工作面的推进,矿柱顶板裂隙逐渐拓展至整个覆岩,顶板沉降区域逐渐贯通,并进一步扩大至整个采场,覆岩沉降形态呈现椭圆拱形结构特征,地表出现小范围的

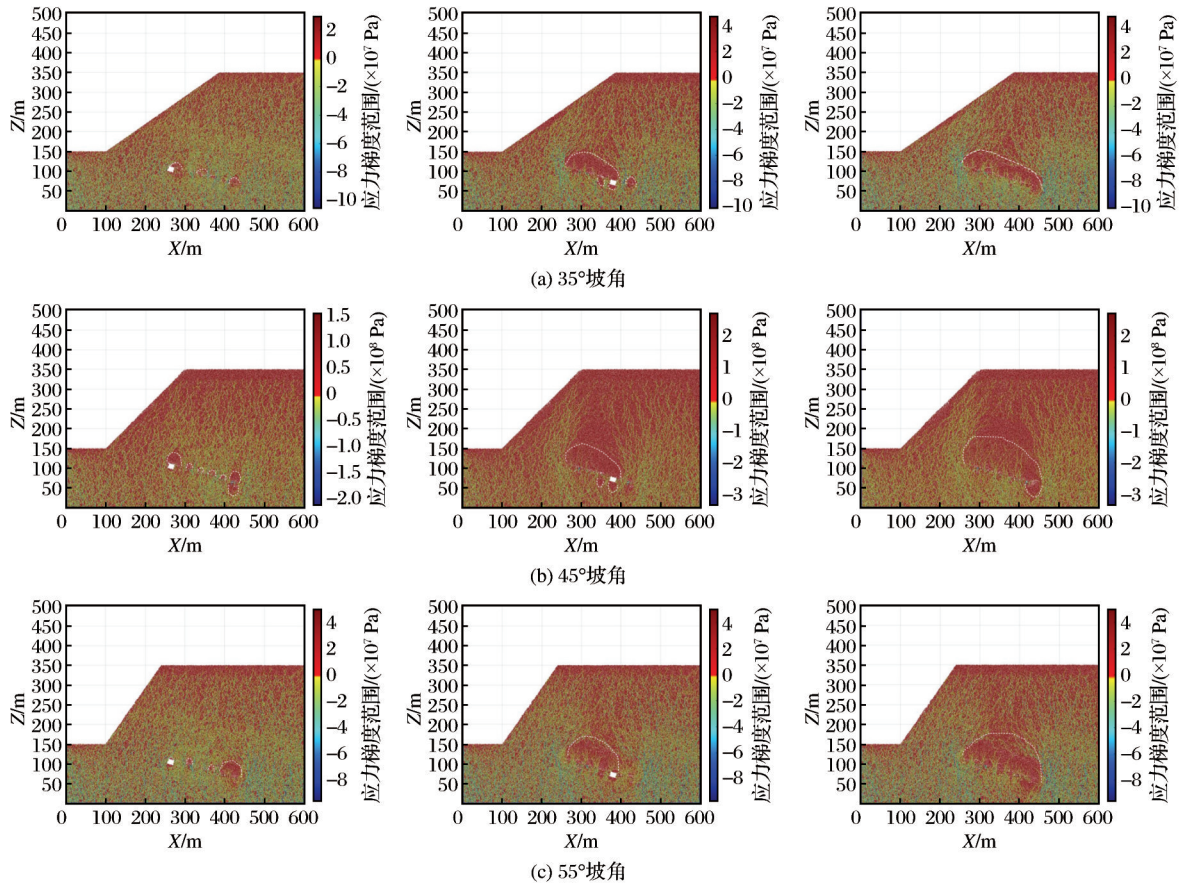


图8 一阶段和二阶段矿柱回采充填应力分布

Fig. 8 Stress distribution of pillar mining and filling in the first and second stage pillar

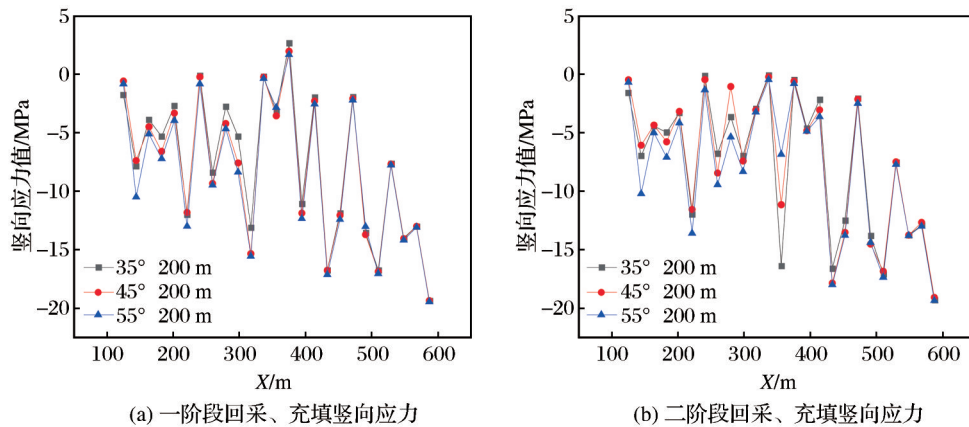


图9 地下采场矿房开采充填竖向应力变化曲线

Fig. 9 Vertical stress variation curves of mining and filling in underground stope room

沉降。椭圆拱形结构垂直于磷矿层结构面的原因是:上覆岩层的自重方向与磷矿层结构面存在倾角,在自重作用下岩体还会发生沿着层理面方向的滑移。

通过对比3种坡角的采场顶板和覆岩变形破

坏现象可知,坡角为55°时在矿房回采充填阶段已经形成了沉降贯通区域,坡角为35°和45°时沉降仅出现在回采矿房上方。在矿柱回采充填阶段,3种边坡在采动效应下,采场顶板均产生较大的位移变化,且坡角越大,采场沉降越大。此外,3种边坡坡

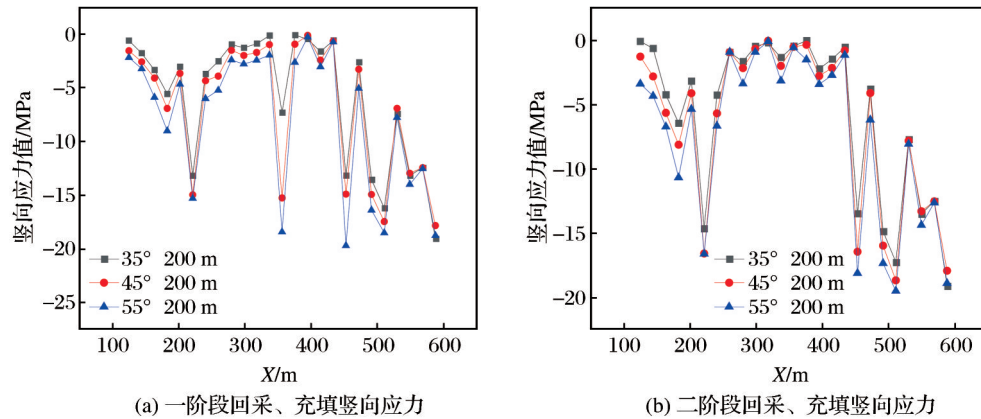


图 10 地下采场矿柱开采充填竖向应力变化曲线

Fig. 10 Vertical stress variation curves of mining and filling in underground stope pillar

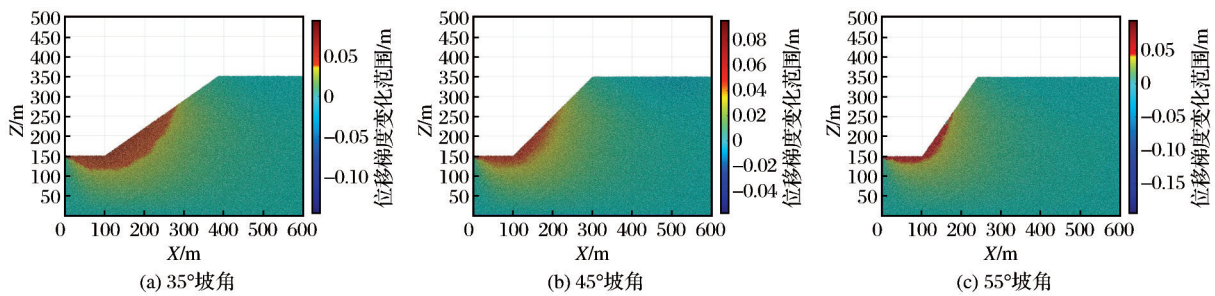


图 11 露天开采位移变化分布

Fig. 11 Distribution of displacement variation in open-pit mining

脚均出现较大范围的卸荷位移,坡角越大,位移变化范围也越大。

5.3 采场位移演变规律

由图 14 和图 15 可以看出,3 种坡角的位移变化趋势基本一致,坡角越大,位移变化越大。如图 14 所示,在矿房回采充填过程中,当坡高为 200 m 时,坡角为 35°、45° 和 55° 条件下最大沉降量分别为 -0.036, -0.191, -0.217 m。二阶段矿房回采充填之后,坡角为 35°、45° 和 55° 条件下最大沉降量分别为 -0.113, -0.564, -0.864 m。由位移变化曲线(图 11)可知,由于矿柱未回采,所以沉降区域未发生贯通现象,最大沉降区域主要集中在矿房采空区顶板,位移变化曲线为“W”形。

如图 15 所示,采场顶板的沉降进一步增加,一阶段矿柱回采充填后,坡角为 35°、45° 和 55° 条件下最大沉降量分别为 -0.533, -0.654, -1.023 m;二阶段矿柱回采充填后,坡角为 35°、45° 和 55° 条件下最大沉降量分别为 -1.309, -1.547, -1.659 m。由位移曲线变化趋势(图 12)可知,由于整个采场矿房和矿

柱被回采充填后,发生了大范围沉降区域贯通现象,最大沉降区域主要位于采场顶板中央区域,位移变化曲线为“V”形。

6 边坡动态变化规律

6.1 边坡应力变化特征

由边坡坡腰应力变化(图 16)可知,在矿房回采充填过程中,坡角为 35°、45° 和 55° 条件下最大应力值分别为 -1.43, -1.06, -0.63 MPa,并逐渐减少至 -0.03, -0.11, -0.17 MPa 之后,逐渐稳定于 -0.03, -0.11, -0.22 MPa,其中矿房#1 的竖向应力值最大。该变化产生的主要原因如下:矿房#1 距离露天边坡坡腰最近,受采动效应的影响最大,因此应力值也最大,之后随着回采充填工作面的推进,应力逐渐递减,整体呈现出距离边坡越远,对边坡稳定性影响越小的变化规律。

在矿柱回采充填过程中,坡角为 35°、45° 和 55° 条件下应力值分别由 -0.04, -0.09, -0.21 MPa 逐渐

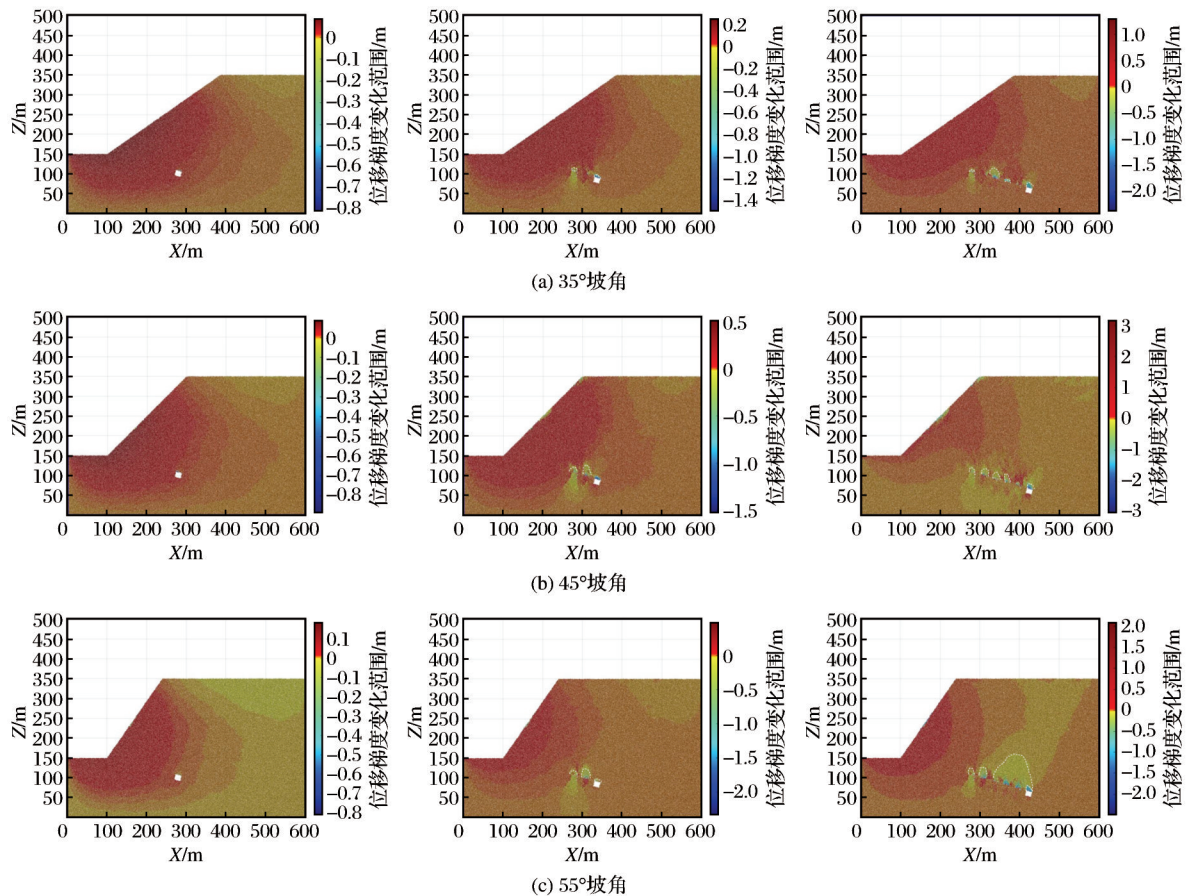


图 12 一阶段和二阶段矿房回采充填位移变化

Fig. 12 Displacement variation of mining and filling in the first and second stage mine room

增加至 $-0.93, -1.03, -1.11$ MPa。由于受地下采动效应的影响,原本已经达到应力平衡的边坡,再次受到影响,应力值逐渐增大。其主要原因是:矿柱的回采导致采场顶板的应力扰动范围逐渐连通并向覆岩和边坡扩散,再次出现应力集中现象,整个地下采场和边坡均受到较大的影响。整体呈现出距离边坡越远,对边坡稳定性影响越大的变化规律。

6.2 边坡位移变化特征

根据边坡坡腰处位移变化(图17)和覆岩位移变化特征(图12和图13)可知,露天开采后边坡卸荷的位移在经过矿房、矿柱回采充填后显著下降,特别是在矿房回采充填过程中坡腰处的位移变化最大,已出现小范围的滑坡,对边坡的稳定性造成了较大的影响。如图17(a)所示,在矿房回采充填过程中,坡角为 $35^\circ, 45^\circ$ 和 55° 条件下,位移由 $0.0401, 0.0399, 0.0391$ m降低至 $0.0102, 0.0089, 0.0081$ m,然后逐渐稳定于 $0.010, 0.0089, 0.008$ m。如图17

(b)所示,在矿柱回采充填过程中,坡角为 $35^\circ, 45^\circ$ 和 55° 条件下,位移分别从 $0.0290, 0.0145, 0.0024$ m下降至 $-0.1108, -0.1242, -0.1344$ m,并逐渐稳定于 $-0.1109, -0.1241, -0.1345$ m。坡角为 35° 时露天开采卸荷的位移最大,3种坡角下的边坡坡腰竖向位移变化呈现抛物线的变化趋势,开采工作面距离露天边坡越远,对坡腰的位移影响越小,竖向位移的变化量也越小。

7 结论

本文以昆阳磷矿二矿作为研究对象,采用MatDEM数值模拟软件建立了 $35^\circ, 45^\circ$ 和 55° 共3种坡角下200 m高陡露天边坡模型,研究了露天转地下充填法开采过程中采场顶板和覆岩的变形破坏特征及其演化规律,得出如下结论:

(1)采场应力变化受到开采工作面的影响而发

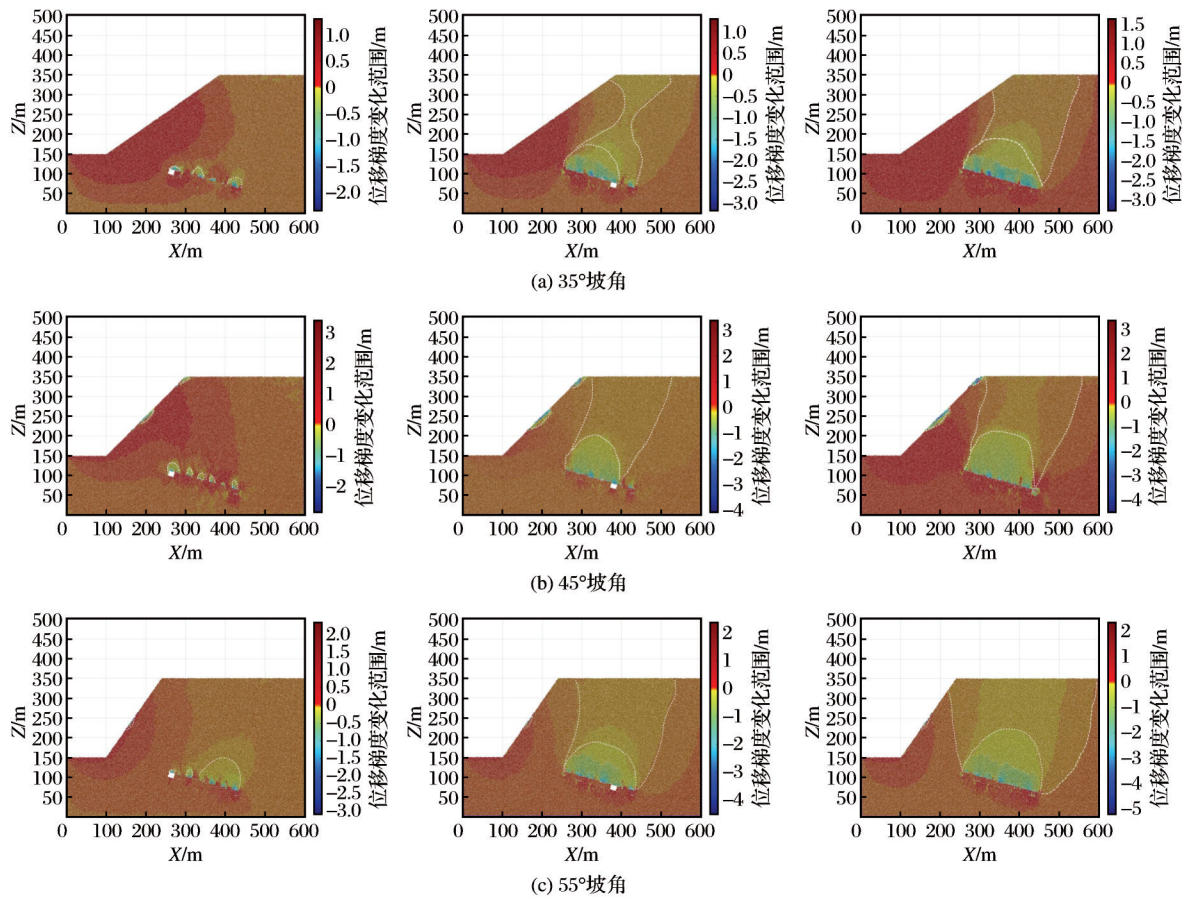


图 13 一阶段和二阶段矿柱回采充填位移变化

Fig. 13 Displacement variation of pillar mining and filling in the first and second stage pillar

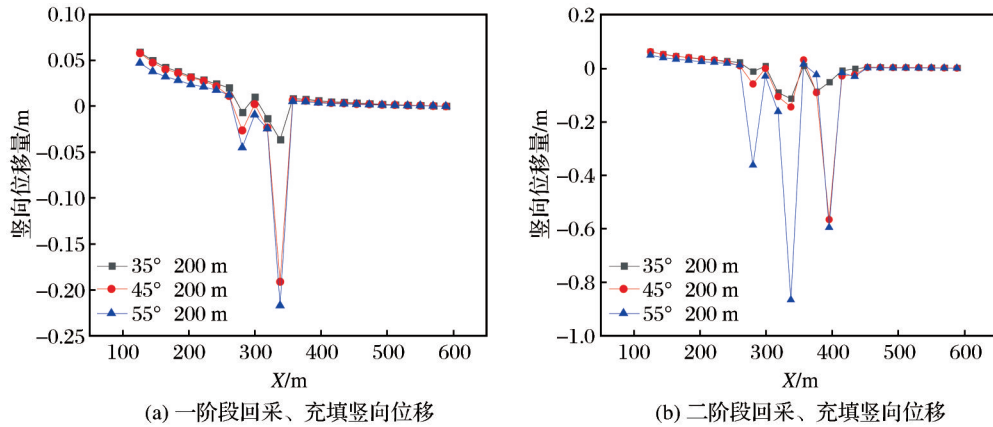


图 14 地下采场矿房开采充填竖向位移变化曲线

Fig. 14 Vertical displacement variation curves of mining and filling in underground mine room

生动态变化,主要经历应力重分布、应力集中、充填压力调整和应力平衡4个阶段。在矿房回采充填阶段,应力集中在采场顶板,矿柱回采充填阶段,应力扰动范围增大至整个覆岩。整体呈现为坡角越

大,应力集中现象越明显,顶板岩体的破坏现象越明显的规律。

(2)在地下开采过程中,顶板中央的沉降区域最大,随着工作面的推进,矿房顶板出现了不同程

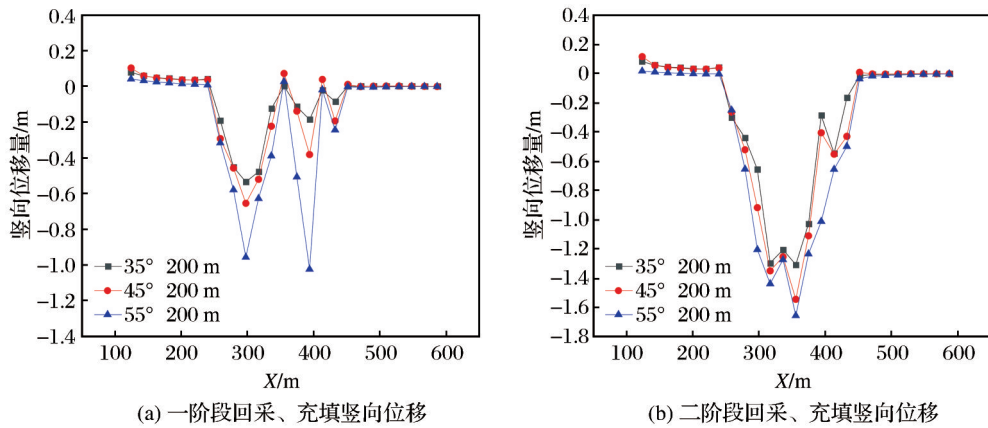


图 15 地下采场矿柱回采充填竖向位移变化曲线

Fig. 15 Vertical displacement variation curves of mining and filling in underground mine pillar

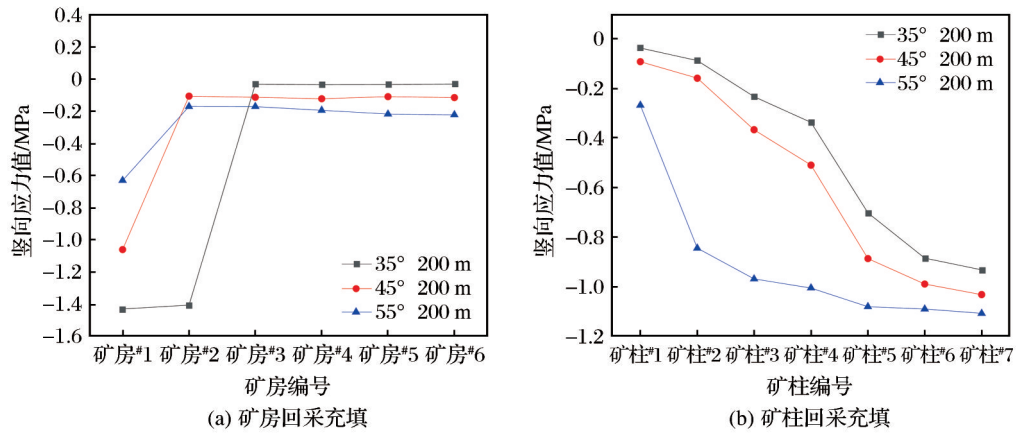


图 16 边坡坡腰应力变化曲线

Fig. 16 Stress variation curves of the slope waist

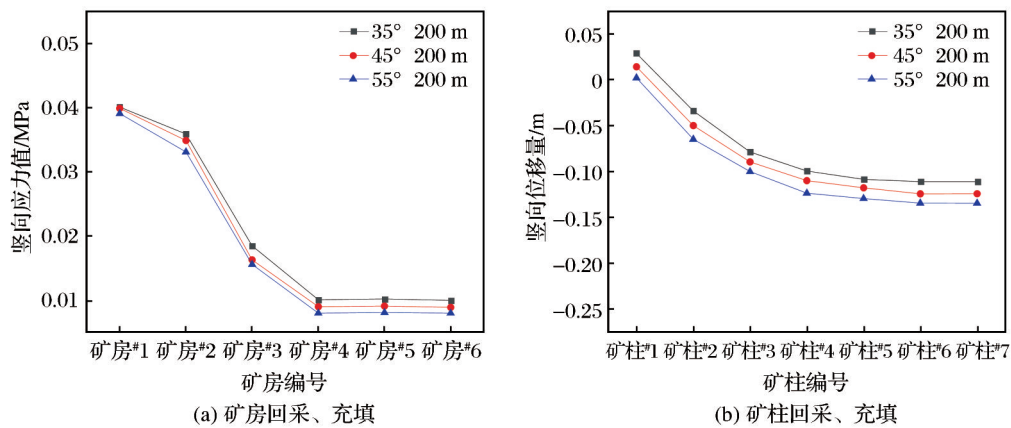


图 17 边坡坡腰位移变化曲线

Fig. 17 Displacement variation curves of the slope waist

度的冒落垮塌现象,覆岩出现了不同程度的弯曲下沉。以采场中心区域为例,垂直于矿层倾向方向出现了不同范围的“椭圆拱”沉降区域,拱形沉降区域

随着开采工作面的推进逐渐增大。

(3)露天开采后边坡出现了明显的卸荷,导致边坡位移增加,矿房和矿柱回采充填后,边坡坡腰

出现了不同程度的拉裂破坏,坡腰处的竖向位移变化呈现抛物线趋势,坡腰处的位移显著下降,并出现小范围的滑坡,坡腰处的应力呈现先降低后增加的趋势,整体呈现坡角越大,边坡稳定性越低,以及破坏程度越大的现象,距离开采工作面越远边坡受到的扰动越小,位移变化量越小。

(4)在后续研究中,可继续采用不同的地下开采方式“隔三采一”,即连续开采3个矿房后再依次进行充填,并对采场顶板及覆岩和边坡变形破坏特征进行研究。同时,考虑采用不同强度膏体充填对采场顶板稳定性的影响,以及我国极寒地区矿山下充填法开采过程中发生强降雨入渗等多场耦合作用下对采场顶板、覆岩变形破坏和边坡稳定性的影响。

参考文献 (References):

- Behera S K, Singh P, Mishra D P, et al, 2023. Required strength design of cemented backfill for underground metalliferous mine[J]. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 37(10): 927-952.
- Kumar H, Deb D, Chakravarty D, 2017. Design of crown pillar thickness using finite element method and multivariate regression analysis[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 27(6): 955-964.
- Li G, Wan Y, Guo J, et al, 2022. A case study on ground subsidence and backfill deformation induced by multi-stage filling mining in a steeply inclined ore body[J]. *Remote Sensing*, 14(18): 4555.
- Li M, Peng Y F, Ding L W, et al, 2023. Analysis of surface deformation induced by backfill mining considering the compression behavior of gangue backfill materials[J]. *Applied Sciences*, 13(1): 160.
- Liu Y Q, Wang X F, Gao J X, 2019. Stability analysis and reinforcement treatment of open pit slope[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 283(1): 012009.
- Qin X S, Cao H, Wang Z X, et al, 2021. Analysis on safe thickness of the horizontal separation pillar in the upward horizontal slicing and filling method[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 861(5): 052051.
- Tian X X, Song Z P, Wang T, et al, 2024. Theoretical analysis of additional surrounding rock pressure in shallow buried bias tunnel[J]. *Scientific Reports*, 14: 30788.
- Xue G L, Yilmaz E, Wang Y D, 2023. Progress and prospects of mining with backfill in metal mines in China[J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 30(8): 1455-1473.
- 陈霖, 黄明清, 唐绍辉, 等, 2022. 大直径深孔空场嗣后充填法采场结构参数优化及稳定性分析[J]. *金属矿山*, 51(11): 44-51. Chen Lin, Huang Mingqing, Tang Shaohui, et al, 2022. Optimization and stability analysis of stope structure parameters of large-diameter deep hole open stoping with subsequent filling[J]. *Metal Mine*, 51(11): 44-51.
- 程东旭, 李晓芸, 郭明明, 2025. 高海拔多矿种缓倾斜多层贫矿脉协同开采研究[J]. *矿业研究与开发*, 45(3): 17-23. Cheng Dongxu, Li Xiaoyun, Guo Mingming, 2025. Research on collaborative mining of multi ore types at high altitude with gently inclined and multi-layer poor ore veins[J]. *Mining Research and Development*, 45(3): 17-23.
- 郭良银, 蒋万飞, 宋召法, 等, 2022. 新城金矿阶段空场嗣后充填法开采大直径深孔切槽爆破方法[J]. *黄金科学技术*, 30(4): 585-593. Guo Liangyin, Jiang Wanfei, Song Zhaoafa, et al, 2022. Large diameter long hole cutoff slot blasting method for sublevel open stoping with delayed filling in Xincheng gold mine[J]. *Gold Science and Technology*, 30(4): 585-593.
- 郝英杰, 王春龙, 姜明伟, 等, 2023. 缓倾斜中厚矿体上向进路充填采矿方法优化及地压控制研究[J]. *有色金属工程*, 13(5): 114-121. Hao Yingjie, Wang Chunlong, Jiang Mingwei, et al, 2023. Optimization of upward approach filling mining method and ground pressure control for gently inclined medium-thick orebody[J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 13(5): 114-121.
- 胡超, 丁成功, 金长宇, 等, 2021. 阶段嗣后充填法采场应力与变形规律及稳定性研究[J]. *金属矿山*, 50(7): 58-65. Hu Chao, Ding Chenggong, Jin Changyu, et al, 2021. Study on stope stress and deformation law and stability of stage and subsequent filling method[J]. *Metal Mine*, 50(7): 58-65.
- 贾林刚, 张华兴, 刘鹏亮, 2022. 充填步距对地表移动变形特征的控制影响[J]. *中国矿业大学学报*, 51(4): 642-650. Jia Lingang, Zhang Huaxing, Liu Pengliang, 2022. The control impact of filling pace on surface movement and deformation characteristics[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 51(4): 642-650.
- 李双, 王运敏, 赵奎, 等, 2019. 金属矿山露天转地下开采的关键问题研究进展[J]. *金属矿山*, 48(12): 12-20. Li Xiaoshuang, Wang Yunmin, Zhao Kui, et al, 2019. Research progress on the key problems in transition from

- open-pit to underground mining for metal mines[J].Metal Mine, 48(12):12-20.
- 李再易,尹丽冰,孙远江,等,2024.某矿充填体合理强度研究[J].采矿技术,24(1):174-179.Li Zaiyi, Yin Libing, Sun Yuanjiang, et al, 2024. Study on reasonable strength of filling body in a mine[J].Mining Technology, 24(1):174-179.
- 梁冰,郭斌,金佳旭,等,2022.基于FLAC^{3D}分析的某铁矿充填效果研究[J].中国安全生产科学技术,18(4):120-126. Liang Bing, Guo Bin, Jin Jiayu, et al, 2022. Research on filling effect of an iron mine based on FLAC^{3D} analysis[J]. Journal of Safety Science and Technology, 18(4):120-126.
- 罗瑞,马锴辉,2019.上向水平分层充填法矿房跨度的确定及采场稳定性分析[J].有色金属(矿山部分),71(3):63-66. Luo Rui, Ma Kunhui, 2019. Determination of span and analysis of stope stability in upward horizontal layered filling method[J].Nonferrous Metals(Mining Section), 71(3):63-66.
- 骆欢,柯川,2024.长沟锰矿充填采矿法试验效果研究[J].中国锰业,42(3):39-43.Luo Huan, Ke Chuan, 2024. Experimental study on the effect of filling mining method in Changgou manganese mine [J]. China Manganese Industry, 42(3):39-43.
- 梅林芳,邓朋,何志义,等,2025.某铁矿床充填采矿方案优选及采场结构参数优化[J].矿业研究与开发,45(2):25-32. Mei Linfang, Deng Peng, He Zhiyi, et al, 2025. Selection of filling mining scheme and optimization of stope structure parameters of an iron deposit [J]. Mining Research and Development, 45(2):25-32.
- 秦予辉,朱旭波,李地元,2010.基于K.B.鲁佩涅依特理论的露天坑下采空区顶板安全厚度计算[J].矿业研究与开发,30(4):66-69. Qin Yuhui, Zhu Xubo, Li Diyu, 2010. Calculation of safe roof thickness of mined-out area under open pit based on K. B. Lu Peinie theory [J]. Mining Research and Development, 30(4):66-69.
- 谭宝会,张志贵,陈星明,等,2021.下向分层胶结充填采场失稳机理及顶板垮塌模式研究[J].地下空间与工程学报,17(6):1988-1996. Tan Baohui, Zhang Zhigui, Chen Xingming, et al, 2021. Study on instability mechanism and roof caving mode of downward stratified cemented filling stope[J].Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 17(6):1988-1996.
- 王东华,2012.上向分层全尾砂胶结充填法采场结构参数优化研究[D].武汉:武汉理工大学.Wang Donghua, 2012. Study on optimization of the stope structure parameter of upward layered and full tailings cemented method[D].Wuhan: Wuhan University of Technology.
- 王孟来,李小双,王运敏,等,2022.露天转地下房柱法开采扰动下采场稳定性研究[J].矿冶工程,42(2):32-37. Wang Menglai, Li Xiaoshuang, Wang Yunmin, et al, 2022. Stope stability under disturbance in transition of open-pit to underground room and pillar mining [J].Mining and Metallurgical Engineering, 42(2):32-37.
- 王平,陈国兴,程爱平,等,2024.不同类型充填体上巷道底板应力解析计算模型研究[J].矿业研究与开发,44(12):83-93. Wang Ping, Chen Guoxing, Cheng Aiping, et al, 2024. Analytical calculation model of roadway floor stress on different types of backfills [J]. Mining Research and Development, 44(12):83-93.
- 王社光,杨志强,王立杰,等,2023.阶段嗣后充填采场充填体合理强度设计[J].现代矿业,39(8):79-81,85. Wang Sheguang, Yang Zhiqiang, Wang Lijie, et al, 2023. Reasonable strength design of filling body in stage subsequent filling stope [J]. Modern Mining, 39(8):79-81,85.
- 王雄雄,马冰洁,张红伟,2024.基于Rhino-FLAC3D的矿山多中段开采方案的可行性研究[J].中国矿山工程,53(4):26-31,82. Wang Xiongxiang, Ma Bingjie, Zhang Hongwei, 2024. Feasibility study of multi-stage mining scheme based on rhino-FLAC3D [J]. China Mine Engineering, 53(4):26-31,82.
- 魏晓明,郭利杰,周小龙,等,2020.高阶段胶结充填体全时序应力演化规律及预测模型研究[J].岩土力学,41(11):3613-3620. Wei Xiaoming, Guo Lijie, Zhou Xiaolong, et al, 2020. Full sequence stress evolution law and prediction model of high stage cemented backfill [J]. Rock and Soil Mechanics, 41(11):3613-3620.
- 徐孟超,2024.复杂难采露天磷矿转地下充填法开采岩体变形破坏特征及其破坏机制研究[D].绍兴:绍兴文理学院. Xu Mengchao, 2024. The study on deformation and failure characteristics of rock mass in complex and difficult-to-mine open-pit phosphate mine during transition to underground backfill mining and its failure mechanism [D]. Shaoxing: Shaoxing University.
- 张志贵,谭宝会,钟敏,等,2021.下向分层进路式胶结充填法采场稳定性判断方法及应用[J].金属矿山,50(4):27-34. Zhang Zhigui, Tan Baohui, Zhong Min, et al, 2021. Determination method and application of stope stability in downward slicing drift cemented filling mining method [J].Metal Mine, 50(4):27-34.

Study on the Impact of Open-pit to Underground Filling Mining on Stope and Slope Stability Based on MatDEM

XU Mengchao^{1,2}, WANG Yunmin^{3,4}, LI Xiaoshuang^{1,5}

1. School of Urban Construction, Changzhou University, Changzhou 213164, Jiangsu, China;

2. State Key Laboratory of Geohazard Prevention and Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China;

3. State Key Laboratory of Safety and Disaster Prevention for Metal Mines, Maanshan 243000, Anhui, China;

4. Sinosteel Maanshan Institute of Mining Research Co., Ltd., Maanshan 243000, Anhui, China;

5. Qilu Institute of Technology, Jinan 250200, Shandong, China

Abstract: The transition from open-pit deep mining to underground mining presents significant challenges in managing ground pressure and ensuring production safety due to the nonlinear deformation of the overlying rock and its roof. To investigate the stability of high, steep rock slopes at varying angles, as well as the dynamic deformation, failure characteristics, and evolutionary patterns of the roof and overlying rock in underground mines, the open-pit to underground filling method employed at Kunyang Phosphate Mine No. 2 was selected as the focus of this study. A 200-meter high steep slope model was developed through a combination of field investigations, laboratory rock mechanics tests, and MatDEM numerical simulations. The study examined stress and displacement variations of the slope at three different angles— 35° , 45° , and 55° —in addition to analyzing the dynamic stress and displacement of the underground mining area's roof and overlying rock, thereby elucidating their evolutionary patterns. The findings of the study demonstrate that during the transition from open-pit to underground filling mining, the displacement of the mining area's roof evolves dynamically from localized settlement to a comprehensive settlement of the overlying rock, particularly during the backfilling of the mining pillar. An "elliptical arch" subsidence zone, centered on the stope and oriented perpendicular to the ore layer's dip direction, progressively enlarges as the working face advances. The range of stress disturbance during the backfilling and filling of the mining room extends from the roof of the mining area to encompass the entire overlying rock during the backfilling and filling of the mining pillars. The stress variations within the mining site are dynamically modulated by the mining face, undergoing four primary stages: stress redistribution, stress concentration, filling pressure adjustment, and stress equilibrium. The mining activities have induced a parabolic vertical displacement curve at the slope waist, resulting in varying degrees of tensile fracture damage. Consequently, the displacement at the slope waist has significantly decreased, leading to the occurrence of small-scale landslides. The study observed differential unloading phenomena at the midsection of the slope, with stress initially decreasing before subsequently increasing. The overlying rock of stope and the roof both exhibit a pattern where a larger slope angle leads to a greater range of displacement and subsidence, as well as an increased variation in stress. The findings offer valuable insights for transitioning open-pit mines to underground mining under similar occurrence conditions.

Key words: filling mining method; overlying rock of stope; MatDEM; dynamic change; deformation and failure; subsidence area