深部采场充填体力学响应特征及数值模拟研究*

范纯超[1],李祖贵[2],丁红梅[2],张仲毅[2],李国清[1],王春来[2]

(1.北京科技大学 资源与安全工程学院, 北京 100083;
2.中国矿业大学(北京) 能源与矿业学院, 北京 100083)

摘要:为揭示深部采场充填体在高地应力与采动扰动下的力学响应规律,以焦家金矿八中段采场为研究对象,通过布设压力盒与沉降计,获取了充填体在不同采动阶段的应力与变形数据,建立了深部采场充填体三维数值模型,得出了充填体在多层回采条件下的应力重分布及变形演化规律。结果表明,充填体在采动扰动过程中的应力呈阶段性波动,爆破阶段最大应力波动幅度约为0.02 MPa,充填体主要表现为弹性应变;回采过程中充填体内部测点应力普遍高于外围测点,竖直方向应力增幅最大。数值模拟结果表明,层间应力传递特征明显,整体呈现由上至下的逐层传递规律,充填体在承载早期变形较为集中且幅度较大,后期则趋于稳定。研究结果可为深部金矿充填体设计与采场稳定性控制提供理论依据和技术参考。

关键词:深部采场;充填体;应力重分布;变形演化规律;数值模拟

中图分类号:TD325 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)02-0001-10

Study on Mechanical Response Characteristics and Numerical Simulation of Filling Body in Deep Stope

FAN Chunchao[1], *LI Zugui*[2], *DING Hongmei*[2], *ZHANG Zhongyi*[2], *LI Guoqing*[1], *WANG Chunlai*[2]

(1.School of Resources and Safety Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;
2.School of Energy and Mining Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: To reveal the mechanical response law of filling body in deep stope under high ground stress and mining disturbance, the stope of the eighth middle section of Jiaojia Gold Mine was selected as the research object. The stress and deformation data of filling body in different mining stages were obtained by setting pressure cells and settlement sensor. The three-dimensional numerical model of filling body in deep stope was established, and the stress redistribution and deformation evolution law of filling body under multi-layer mining conditions were obtained. The results show that the stress of the filling body fluctuates periodically in the process of mining disturbance. The maximum stress fluctuation in the blasting stage is about 0.02 MPa, and the filling body is mainly elastic strain. During the mining process, the stress of the internal measuring points of the filling body is generally higher than that of the peripheral measuring points, and the vertical stress increases the most. The numerical simulation results show that the interlayer stress transfer characteristics are obvious, and the overall layer-by-layer transfer law from top to bottom is presented. The deformation of the filling body is relatively concentrated and large in the early stage of bearing, and tends to be stable in the later stage. The research results can provide theoretical basis and technical reference for the design of filling body and stability control of stope in deep gold mine.

Key words: Deep stope, Filling body, Stress redistribution, Deformation evolution law, Numerical simulation

0 引言

山东胶东半岛是我国重要的金矿富集区之一,矿床类型以断裂蚀变岩型金矿为主,具有埋藏深、构造复杂、应力水平高等特征[1-2]。近年来,随着浅部矿体资源逐渐枯竭,焦家、玲珑、三山岛等大型金矿

* **收稿日期**:2025-10-10
基金项目:国家自然科学基金联合基金重点项目(U24B2043)
作者简介:范纯超(1986—),男,山东新泰人,博士,主要从事地下矿山绿色采矿、深井开采、智能矿山建设研究。E-mail:fanchunchao@sd-gold.com
通信作者:王春来(1976—),男,河北唐山人,博士,教授,博士生导师,主要从事冲击灾害诱发机理、预警及调控技术研究。E-mail:tswcl@126.com

相继进入千米级深部开采阶段。焦家金矿作为胶东地区典型的深部断裂型金矿,其开采深度已超过900 m,因其地应力高、围岩结构复杂、采动扰动强烈,充填体和围岩的稳定性问题日益突出。深部充填采矿过程中,充填体不仅承担上覆岩体的地压传递作用,还直接影响采场的稳定性和矿山的安全生产,因此,研究充填体在高地应力及采动扰动作用下的力学响应规律具有重要的工程意义和理论价值[3]。

近年来,国内外学者围绕矿山充填体的力学特性、破坏机理及稳定性开展了广泛研究。MITCHELL等[4]最早建立了水泥胶结充填体的流变模型,揭示了其早期强度发展与变形之间的关系。ABRAHAM等[5]在美国LuckyFriday矿布设原位监测装置,发现充填体应力演化经历弹性、软化与塑性阶段的转变,表明其具有明显的时效性与分层响应特征。随着数值计算与监测技术的进步,充填体多尺度力学响应研究取得了显著进展。朱斌等[6]采用Rhino-Griddle-FLAC3D耦合建模方法,系统分析了下向进路倾斜分层胶结充填体中分层数目、角度及跨高比对顶板稳定性的影响规律。黄旭利等[7]结合正交试验识别出矿房宽度及充填体强度对顶板沉降的影响。董志富等[8]基于FLAC3D数值模拟,提出了嗣后充填条件下灰砂比优化与底部结构改进方案。王雨萌等[9]通过3DMine-Rhino-FLAC3D建模与InSAR监测结合,揭示了深部采动对浅部采场的扰动机制。LI等[10]通过试验与耦合建模研究了爆破条件下水泥回填土的动态损伤行为。SUN等[11]结合FLAC3D与正交试验识别了厚松散层下条带充填开采中地表变形的主控因素。随着高精度试验和智能识别技术的发展,学者们进一步探索了充填体的微观损伤与裂隙演化机制。YANG等[12]基于数字图像相关技术(DIC)研究了充填体裂隙演化规律,揭示了其非均匀破坏机理。侯新澳等[13]通过现场监测与数值模拟,提出了适用于深部磷矿大断面交叉口的协同支护体系。ZHANG等[14]通过高分辨率HSV图像识别建立了裂缝演化预测模型,为充填体损伤判识提供了新手段。LI等[15]基于试验、数值模拟与现场监测相结合的手段,建立了考虑蠕变效应的分数阶Burgers本构模型,阐明了煤矸石回填材料的长期变形规律。

总体来看,当前充填体研究已从单一力学分析向“试验-数值-监测”多维融合发展,并取得了重要进展。然而,对深部高地应力与多层回采耦合作用下充填体的长期应力-变形演化规律仍缺乏系统认识。针对上述不足,本文以焦家金矿为研究对象,结合现场应变监测与数值模拟分析,研究深部充填体及围岩的受力与变形规律,揭示其在深部多层回采条件下的演化机制。研究结果可为焦家金矿及类似深部金矿的充填体参数设计、采场稳定性控制及安全开采提供理论依据和技术支持,对促进深部资源高效、安全、绿色开采具有重要的现实意义。

1 工程概况与监测方案

1.1 工程概况

焦家金矿位于山东省莱州市,地处胶东半岛北部,是我国大型金矿床之一。矿区地质构造复杂,断裂系统发育,主要受NE向断裂带控制,矿体赋存于花岗岩及其蚀变岩带中,矿体延深超过900 m,厚度变化大,形态不规则。围岩主要为中细粒花岗岩,岩体节理裂隙较为发育,整体结构性差异明显,局部存在弱化带。矿区主要采用上向水平分层充填采矿法进行深部开采。随着开采深度的增加,矿体周围地应力显著增大,采动扰动频繁,充填体与围岩在循环采充条件下的受力状态愈加复杂。为系统分析充填体在深部复杂应力环境下的应力与变形规律,选取八中段J080111002盘区作为主要现场监测试验采场。

八中段采用厚大矿体盘区式多步骤上向水平分层充填采矿法,采场垂直矿体走向布置。一步骤、二步骤为分层回采,三步骤为进路回采,按照“隔二采一”的回采顺序。各步骤采场宽度均为5 m,空顶高度为3.8 m,一步骤、二步骤采场充填高度为3.3 m、空顶0.5 m,第三步骤采场接顶充填。底柱回采5.0 m、充填3.5 m,其上分层回采3.3~3.4 m、充填3.3~3.4 m,每次充填后留出约1.5 m空间,以利于上分层作业与回采通风。充填体采用胶结充填工艺,材料由水泥、尾砂及碎石按比例混合,经搅拌后通过管路泵送至采场,形成连续支撑结构。灰砂比控制在(1∶4)~(1∶5)之间,浆体质量浓度为78%~82%。根据矿山长期生产经验及现场力学试验结果,充填体28 d无侧限抗压强度要求不低于3.5 MPa,以确保其在上部分层回采前具有足够的承载能力与稳定性。早期充填体在固结初期(7 d)强度为1.5~2.0 MPa,可满足施工间隔要求。

1.2 监测方案

通过压力盒传感器测量充填体在竖直、沿矿体走向及垂直矿体走向三个方向的应力变化,分析采动下的充填体及围岩应力集中与释放规律;利用单点沉降计观测充填体在竖直及垂直矿体走向的变形,研究采动对充填体累积变形的影响。整个监测系统由传感器组、信号传输线、数据采集仪及地表控制终端组成。

在监测布置上,依据采场分层充填采矿法的工艺特点,一步骤、二步骤采场为分层回采,三步骤采为进路回采,采用"隔二采一"的回采顺序。为此,监测仪器均布置在一步骤采场中。安装前通过全站仪精确定位监测点,确保监测点位置与设计一致。采场内部布置 6 个压力盒与 5 个单点沉降计,沉降计分别布设于竖直方向及垂直矿体走向方向,不同监测点距充填挡墙距离分别为 15 m、35 m 与 55 m,以反映充填体不同区域的沉降差异;压力盒布置原则同样遵循竖直、沿矿体走向及垂直矿体走向三个方向分布,确保能够全面反映采场内的三维受力状态。深部开采充填体应力变形实时监测系统第一分层沉降计与压力盒具体安装位置见表 1,仪器布置示意如图 1 所示。

表 1 监测仪器安装信息

Table 1 Monitoring instrument installation information

仪器类型	出厂编号	监测点	距充填挡墙距离/m	安装方向
压力盒	32469	Y-A1	55	垂直矿体走向
压力盒	38373	Y-A2	55	沿矿体走向
压力盒	2427	Y-A3	55	竖直
压力盒	15905	Y-A4	15	竖直
压力盒	54840	Y-A5	15	垂直矿体走向
压力盒	22992	Y-A6	15	沿矿体走向
单点沉降计	2148	C-A1	55	竖直
单点沉降计	30471	C-A2	55	垂直矿体走向
单点沉降计	26868	C-A3	35	垂直矿体走向
单点沉降计	45291	C-A4	15	垂直矿体走向
单点沉降计	48561	C-A5	15	竖直

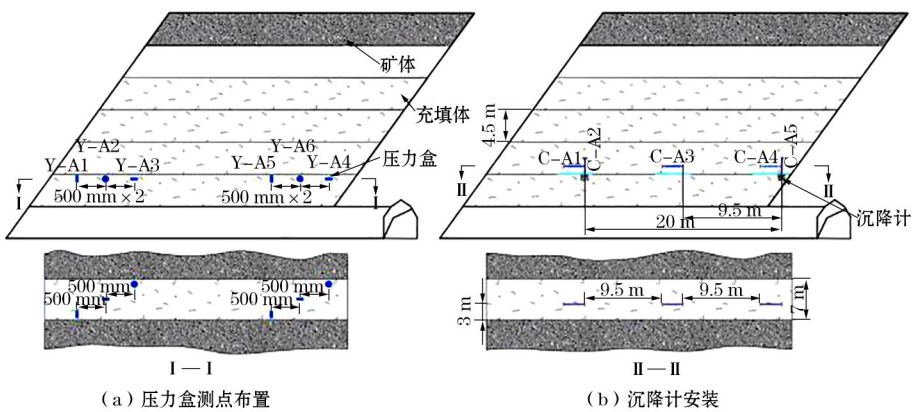


图 1 仪器布置示意

Fig.1 Schematic diagram of instrument layout

安装过程中严格遵循监测要求进行保护与固定。压力盒受力面与主应力方向垂直安装,外包细砂并压实,以确保应力传递均匀;沉降计采用钻孔预埋,锚头固定于稳定岩体,法兰沉降盘置于监测高程,传输电缆由 PVC 钢丝波纹管保护并集中引出采场外,防止受损。所有传感器经调试后接入自动采集系统,实现远程、定时、连续监测与数据存储。系统运行初期监测频率为 1 h/次,数据稳定后调整为 2 h/次。自动采集系统可同步记录传感器编号与通道信息,保证数据的准确性与可追溯性,并通过定期数据导出与分析,实现对充填体应力变形及围岩响应的动态评估。

2 监测结果分析

2.1 应力演化规律分析

为分析上向分层矿体回采过程中充填体受采动影响的受力响应特征,选取具有代表性的 24 h 时间段,对充填体在此期间的受力变化情况进行分析。图 2 为充填体 24 h 内不同方向的应力变化曲线。由图 2 可知,充填体在三个方向的应力均出现轻微波动,12:00～16:00 时段发生应力突变,其中竖直方向的应力变化最为显著,其余时间段应力总体保持平稳。结合矿山生产实际可知,该时段为采场爆破作业时间,爆破扰动导致底部充填体的结构应力

发生瞬时变化,表明采动影响使充填体及围岩内的应力场产生波动,地压活动显著增强。尽管如此,应力变化幅度总体较小,竖直方向最大应力变化约为0.02 MPa,说明充填体仅发生弹性应变而未出现破坏,爆破结束后应力迅速恢复至稳定状态。由于Y-A1、Y-A2和Y-A3位于采场内部,受围岩原始应力及采动影响较强,其充填体应力普遍高于采场外部的监测点Y-A4、Y-A5和Y-A6。竖直方向与垂直矿体走向方向的应力差约为0.052 MPa,沿矿体走向方向的应力差约为0.041 MPa。

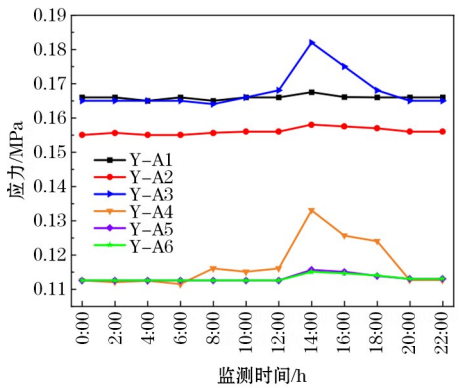


图2 充填体24 h内不同方向应力演化曲线

Fig.2 Stress evolution curves of the filling body in different directions within 24 hours

为分析充填体在服役阶段的应力演化规律,选取上向第二层矿体正常回采过程中连续21 d的监测数据,对充填体受力情况进行分析,监测结果如图3所示。由图3可知,随回采工程推进,竖直方向监测点Y-A3前10 d应力波动较小且整体保持平稳,后11 d逐渐增大,增长约0.08 MPa;监测点Y-A4应力变化较为平稳,21 d内增幅约0.05 MPa。沿矿体走向方向,采场内部监测点在回采初期4 d内,充填体应力由0.151 MPa升至0.162 MPa,随后基本保持稳定;采场外部监测点的应力约为0.115 MPa,整体波动较小。垂直矿体走向方向,采场内部监测点应力由0.181 MPa缓慢增长至0.202 MPa,采场外部监测点由0.161 MPa增至0.179 MPa,呈持续缓升趋势。总体而言,在上层矿体回采过程中,采场内部监测点各方向应力均高于采场外部监测点,应力变化呈先增大后趋于平稳的特征,竖直方向增幅最为明显,表明充填体在服役初期受采动作用影响较大,内部应力集中效应突出。

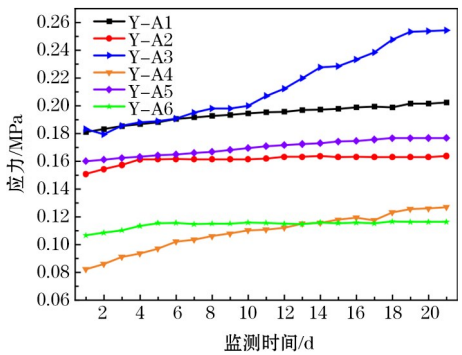


图3 充填体21 d不同方向应力演化曲线

Fig.3 Stress evolution curves of the filling body in different directions at 21 days

2.2 变形演化规律分析

图4为充填体24 h内不同方向变形演化曲线。由图4可知,所有监测点的变形量均为负值,表明充填体呈沉降趋势,竖直方向变形量大于垂直矿体走向方向变形量。垂直矿体走向方向三个监测点均在12:00~14:00时段出现轻微变形,表明三个监测点位置充填体的变形均在不同程度上受到上层矿体回采活动的影响;监测点C-A2充填体变形明显大于其余两个监测点,表明采场内部充填体受地应力影响更大。

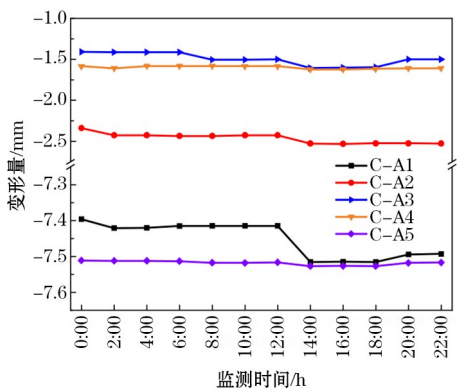


图4 充填体24 h内不同方向变形演化曲线

Fig.4 Deformation evolution curves of the filling body in different directions within 24 hours

图5为充填体21 d不同方向变形演化曲线。由图5可知,上层矿体回采前10 d,竖直方向监测点C-A1充填体变形量小于监测点C-A5变形量,随着矿体回采工作的推进,监测点C-A1充填体变形量不断增大,21 d沉降变形量为0.8 mm,监测点C-A5充填体沉降变形则较为平稳,21 d仅沉降变形量仅为0.25 mm。10 d后监测点C-A1充填体变形大于

监测点 C-A5 变形，表明充填体上层矿体回采作业对充填体变形具有显著影响。在垂直矿体走向方向上，不同测点充填体的变形量差异显著，采场内部监测点 C-A2 的 21 d 变形量最大，由 2.27 mm 增大到 2.68 mm，采场中间监测点 C-A3 充填体 21 d 变形量最小，为 0.22 mm，表明在服役初期充填体变形受采场内地应力分布的不均匀性影响较大。

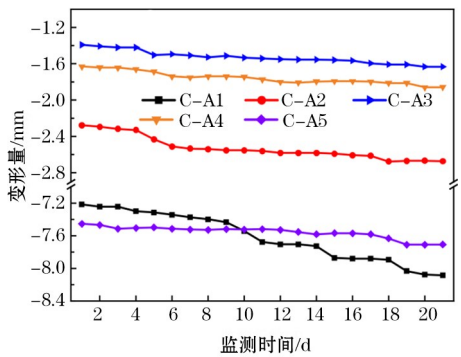


图 5　充填体 21 d 不同方向变形演化曲线

Fig.5　Deformation evolution curves of the filling body in different directions at 21 days

3　采场充填体数值模拟

3.1　数值模型建立

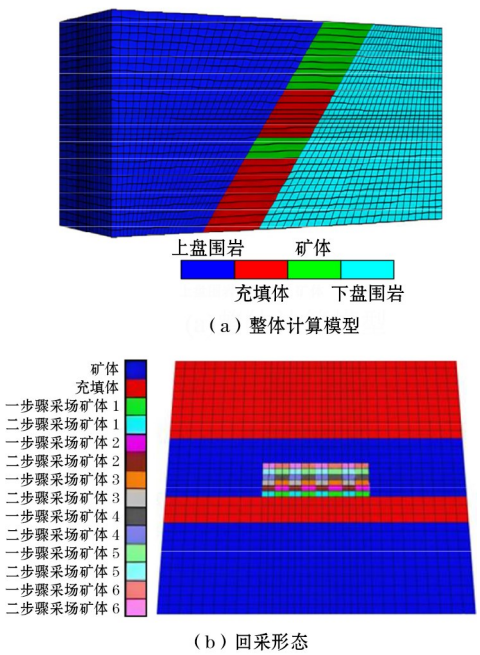
运用 FLAC3D 建立采场充填体数值计算模型，模型长×宽×高＝500 m×180 m×150 m，矿体倾角为 40°，坐标轴 z 方向为竖直方向，y 方向沿矿体走向，x 方向垂直矿体走向。模型底部边界施加三向位移约束，固定各方向位移以模拟深部基岩的整体支承效应；侧向边界设置为远场法向约束，限制法向位移而允许切向位移；模型顶部边界设置为自由边界，允许竖向位移[16]。假定模型中所有材料均满足摩尔-库伦特性，本研究采用的力学参数见表 2。围岩与矿石参数依据岩石力学试验确定；充填体参数来源于焦家金矿八中段现场配比胶结尾砂充填体的室内试验数据。考虑分层充填间龄期差异及应力水平变化，综合取二步骤采场充填体 28 d 稳定阶段试验结果作为代表值。

数值计算模型顶部为自由表面，模型左侧边界以及右侧边界均约束水平位移，底边界固定。模拟两个盘区，包括 4 个一步骤采场和 4 个二步骤采场；模拟过程中，每步骤采场按照由下往上的顺序分 6 层回采，各分层的 4 个采场同时回采、同时充填。三维数值计算模型如图 6 所示。

表 2　力学计算参数

Table 2　Mechanical calculation parameters

材料	容重/(kN·m^{-3})	抗拉强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
围岩	26.4	5.90	60.56	0.25	9.94	46.82
矿体	28.2	7.49	92.79	0.16	10.12	31.84
充填体	21.6	0.50	6.10	0.36	0.84	38.00



(a) 整体计算模型

(b) 回采形态

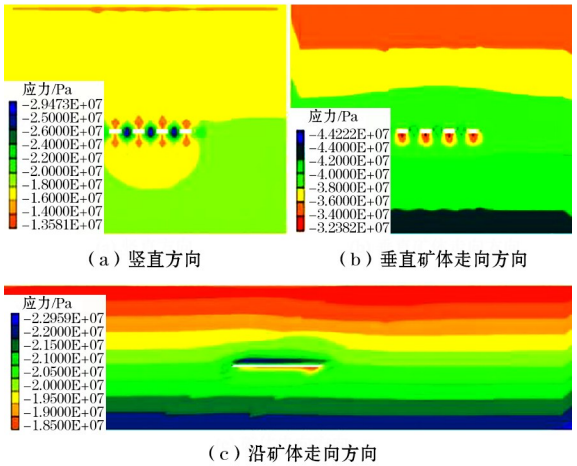
图 6　三维数值计算模型

Fig.6　Three-dimensional numerical model

3.2　数值模拟结果

3.2.1　一步骤采场开采应力分析

图 7 为一步骤采场第一分层回采后充填体及围岩在不同方向上的应力云图。由图 7(a)可知，一步骤采场开挖后，二步骤采场矿体起临时矿柱的作用，二步骤采场矿体应力在垂直方向上的分布表现为中部集中、上下减弱的特征，盘区中部二步骤采场矿体应力集中程度高于两侧，最大竖向应力为 29.5 MPa；盘区两帮同样表现出明显应力集中现象，最大应力为 22.0 MPa。一步骤采场开挖后，采场底板形成较大范围的应力释放区，压力降低约 2.0 MPa。由图 7(b)可知，一步骤采场开挖后形成自由面，在水平应力作用下，垂直矿体走向方向采场底板应力集中明显，最大应力为 40.0 MPa；两帮则发生应力释放，相较周围岩体减小 4.0 MPa。由图 7(c)可知，沿矿体走向方向上，受水平应力作用及一步骤采场开采影响，一步骤采场顶底板区域表现出较弱应力集中现象。



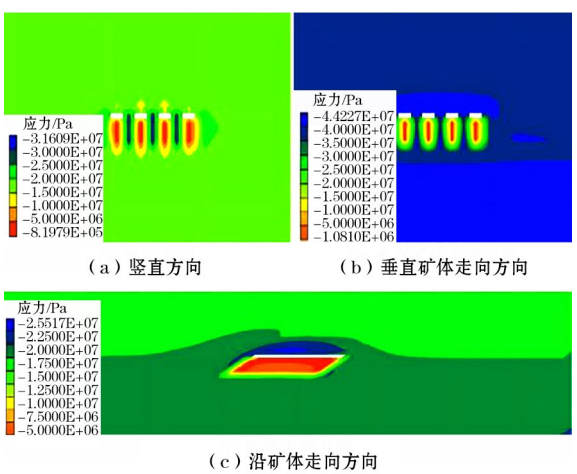
(a) 竖直方向 (b) 垂直矿体走向方向

(c) 沿矿体走向方向

图 7 一步骤采场第一分层回采后充填体及围岩在不同方向上的应力分布云图

Fig.7 Stress distribution cloud diagrams of filling body and surrounding rock in different directions after the first layer mining in one-step stope

图 8 为一步骤采场第六分层回采结束后充填体及围岩在不同方向上的应力云图。由图 8(a)可知,随着一步骤采场开采层数的增加,盘区两帮的应力集中区范围逐渐扩大,二步骤采场矿体内部应力水平有所下降。此时,充填体开始承担部分上覆载荷,采场顶板及二步骤采场矿体的部分应力向充填体转移,充填体最大承载应力可达 5 MPa。由图 8(b)可知,一步骤采场的大规模开采,使得盘区两帮表现出明显的应力集中并在整个盘区形成贯通,最大应力达到 40 MPa,充填体受力也随之增高;由图 8(c)可知,一步骤采场顶板最大水平应力为 25.5 MPa,较开采初期增大 3.1 MPa;底板应力增大 2.1 MPa。



(a) 竖直方向 (b) 垂直矿体走向方向

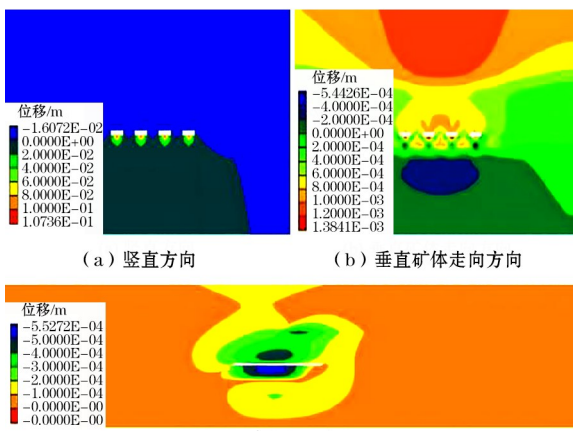
(c) 沿矿体走向方向

图 8 一步骤采场第六分层回采后充填体及围岩在不同方向上的应力分布云图

Fig.8 Stress distribution cloud diagrams of filling body and surrounding rock in different directions after the sixth layer mining in one-step stope

3.2.2 一步骤采场开采变形分析

图 9 为一步骤采场第一分层回采后充填体及围岩在不同方向上的位移云图。由图 9(a)可知,在围压作用下,一步骤采场开挖后采场底板发生明显的底鼓变形,最大底鼓量达 8.0 cm;二步骤采场矿体作为临时矿柱承担上覆载荷,出现一定程度的竖向压缩变形,最大变形量为 1.2 mm。由图 9(b)可知,随着一步骤采场矿体的开挖,采场围岩及二步骤采场矿体因获得自由空间而产生应力释放与重新分布,采场两帮围岩向内部发生收敛变形,其中盘区两帮处形成显著的水平变形集中区,最大水平变形量约为 8.10 mm。由图 9(c)可知,沿矿体走向方向,采场顶底板中部变形最显著,并向两端逐渐减小,最大变形量分别为 0.55 mm 和 0.50 mm,变形幅度由采场中部向两端逐渐衰减。



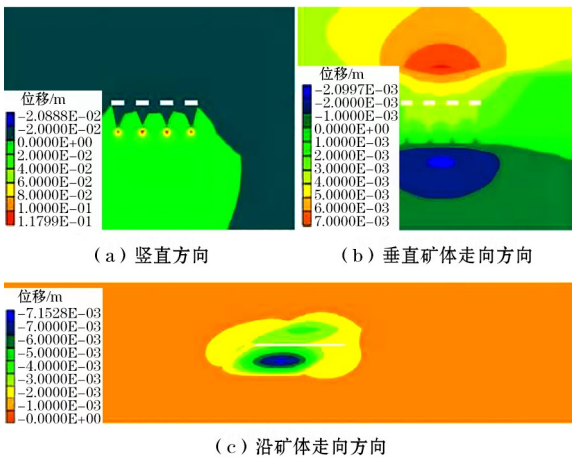
(a) 竖直方向 (b) 垂直矿体走向方向

(c) 沿矿体走向方向

图 9 一步骤采场第一分层回采后充填体及围岩在不同方向上的位移云图

Fig.9 Displacement cloud diagrams of filling body and surrounding rock in different directions after the first layer mining in one-step stope

图 10 为一步骤采场第六分层回采后充填体及采场围岩在不同方向上的位移云图。由图 10(a)可知,随着矿体分层回采与充填的逐步进行,早期充填体的沉降变形更为显著,最大变形量约为 10 cm,后续分层充填体未发生明显变形。由图 10(b)可知,在垂直矿体走向方向上,受较强水平应力作用,充填体均出现一定程度的变形,随着第六分层矿体的顺利回采,下部充填体的最大变形量达到 3～4 mm。由图 10(c)可知,一步骤采场第六分层矿体回采后,下方充填体中心处沿矿体走向方向的变形最为显著,最大变形量约为 7.15 mm,且该变形呈向外辐射递减的分布特征,边缘区域约为 2 mm。



(a) 竖直方向 (b) 垂直矿体走向方向

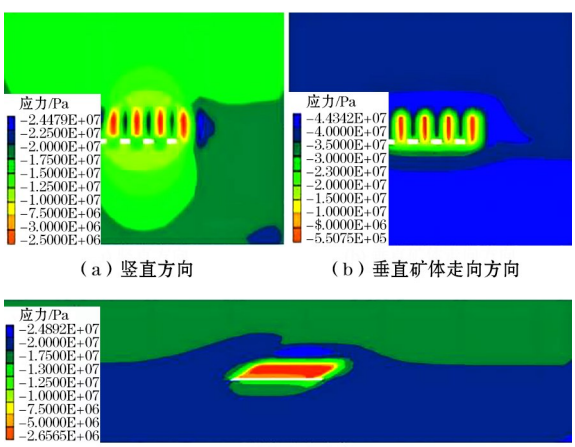
(c) 沿矿体走向方向

图 10 一步骤采场第六分层回采后充填体及围岩在不同方向上的位移云图

Fig.10 Displacement cloud diagrams of filling body and surrounding rock in different directions after the sixth layer mining in one-step stope

3.2.3 二步骤采场开采应力分析

图 11 为二步骤采场第一分层回采后充填体及围岩在不同方向上的应力云图。



(a) 竖直方向 (b) 垂直矿体走向方向

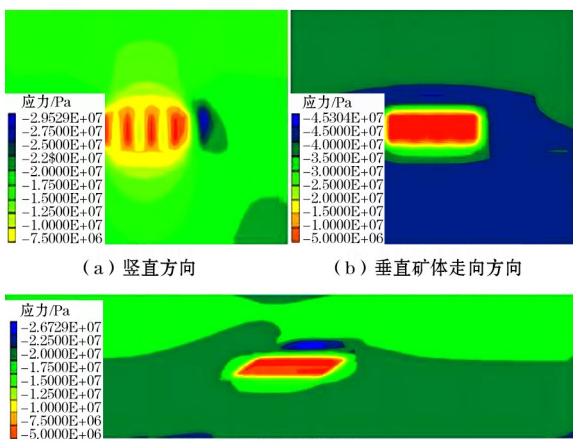
(c) 沿矿体走向方向

图 11 二步骤采场第一分层回采后充填体及围岩在不同方向上的应力分布云图

Fig.11 Stress distribution cloud diagrams of filling body and surrounding rock in different directions after the first layer mining in two-step stope

由图 11(a)可知,上盘围岩的应力集中现象得到明显缓解,一步骤采场充填体整体受力分布变化较小。随着二步骤采场第一分层矿体的回采,盘区两帮应力变化不明显,采场下盘围岩形成了较大范围的应力释放区。这是因为一步骤采场第六分层充填体承担了部分上覆应力,二步骤采场第一分层的开挖弱化了水平应力对底板的挤压作用。由图 11(b)可知,在垂直矿体走向方向上,二步骤采场矿体的开挖导致采场下盘围岩出现大范围应力卸压区,而一步骤采场充填体的应力变化较小,未能有效分担上部应力,进而导致顶板应力集中区进一步扩大。由图 11(c)可知,沿矿体走向方向上,充填体上盘的应力集中区范围增大,且二步骤采场矿体开挖区域附近形成连续的应力卸载带,导致一步骤采场靠近上盘方向的充填体应力有所增强。

图 12 为二步骤采场第六分层回采后充填体及围岩在不同方向上的应力云图。由图 12(a)可知,随着二步骤采场矿体的逐层回采,盘区两帮应力分布情况并没有明显变化,而一步骤采场充填体应力明显增大,局部区域应力可达 17 MPa,一步骤采场充填体平均应力是二步骤采场充填体的 2 倍。由图 12(b)可知,在垂直矿体走向方向上,随着二步骤采场矿体的逐层回采,二步骤采场充填体承载应力逐渐增大,当第六分层充填结束后,一步骤采场充填体与二步骤采场充填体受力情况基本一致,第六分层充填体应力略大于第一分层充填体的应力。由图 12(c)可知,沿矿体走向方向上,充填体周围出现明显的应力卸载区,早期回采分层充填体的应力高于后回采分层充填体,采场内部充填体应力高于采场外部充填体,应力相差 2～3 MPa,这与现场充填体应力监测的结论一致。



(a) 竖直方向 (b) 垂直矿体走向方向

(c) 沿矿体走向方向

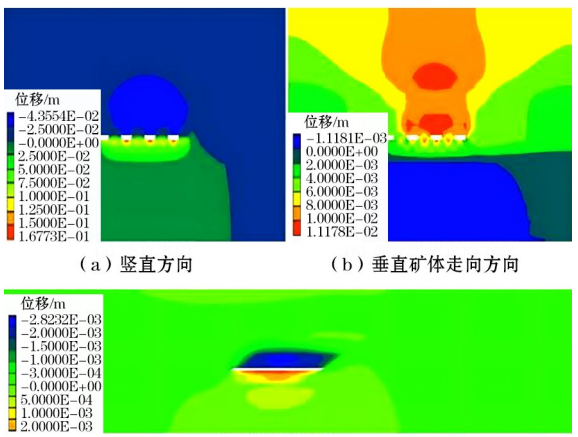
图 12 二步骤采场第六分层回采后充填体及围岩在不同方向上的应力分布云图

Fig.12 Stress distribution cloud diagrams of filling body and surrounding rock in different directions after the sixth layer mining in two-step stope

3.2.4 二步骤采场开采变形分析

图 13 为二步骤采场第一分层回采后充填体及采场围岩在不同方向上的位移云图。由图 13(a)可

知,最大沉降变形位于二步骤采场顶板,最大变形量为 4.3 cm。由图 13(b)可知,在垂直矿体走向方向上,二步骤采场上盘围岩变形较明显,变形量为 8～11 mm;充填体仅在盘区中部出现轻微变形,变形量约为 5 mm。由图 13(c)可知,沿矿体走向方向上,受地应力影响,二步骤采场第一分层下盘岩体受到挤压发生变形,变形量约为 1.5 mm,采场顶板及一步骤采场充填体发生 2～2.8 mm 的压缩变形。



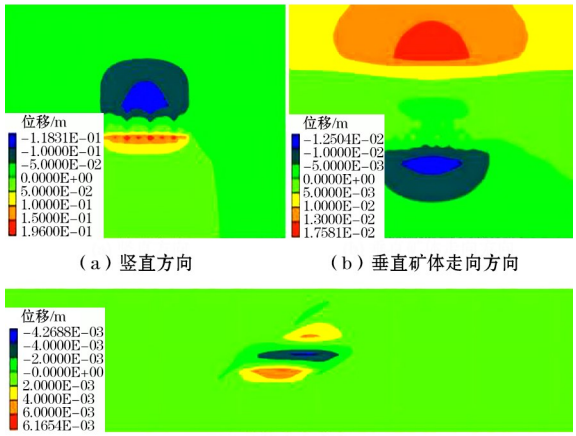
(a) 竖直方向 (b) 垂直矿体走向方向

(c) 沿矿体走向方向

图 13 二步骤采场第一分层回采后充填体及围岩在不同方向上的位移云图

Fig.13 Displacement cloud diagrams of filling body and surrounding rock in different directions after the first layer mining in two-step stope

图 14 为二步骤采场第六分层回采后充填体及采场围岩在不同方向上的位移云图。由图 14(a)可见,竖直方向最大位移出现在二步骤采场顶板,最大位移值为 11.8 cm。相比同分层的一步骤采场,二步骤采场顶板沉降量更大,说明在实施大规模一步骤回采后,二步骤采场矿体上方的应力集中及回采作业对二步骤采场矿体产生了显著扰动,导致其回采过程中的围岩变形增大。对于充填体而言,随着各分层二步骤采场矿体的依次回采,其变形呈递增趋势,其中第一分层充填体变形最大,变形量可达 10 cm,第六分层变形量最小。由图 14(b)可知,在垂直矿体走向方向上,二步骤采场上下盘围岩变形较为显著,变形范围为 10～15 mm,而充填体仅在盘区中部采场出现轻微变形,约为 5 mm。由图 14(c)可知,二步骤采场第六分层充填完成后,沿矿体走向方向上,六个分层的二步骤采场充填体中心位置变形最大,变形量约为 4 mm,且变形量自中心向周边逐渐减小,约为 2 mm。



(a) 竖直方向 (b) 垂直矿体走向方向

(c) 沿矿体走向方向

图 14 二步骤采场第六分层回采后充填体及围岩在不同方向上的位移云图

Fig.14 Displacement cloud diagrams of filling body and surrounding rock in different directions after the sixth layer mining in two-step stope

3.3 充填体力学响应特征分析

为更清晰了解开采过程中充填体的应力和变形演化规律,数值模拟过程中在一步骤采场第一分层不同方向设置监测点,绘制应力、变形曲线,如图 15 和图 16 所示。

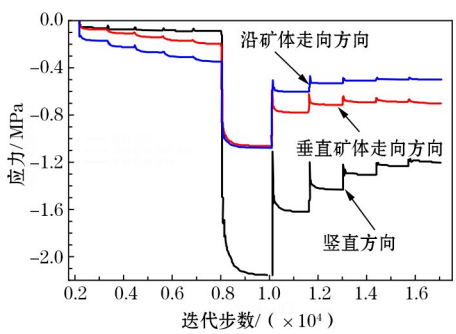


图 15 一步骤采场第一分层充填体应力演化曲线

Fig.15 Stress evolution curves of the filling body in the first layer of one-step stope

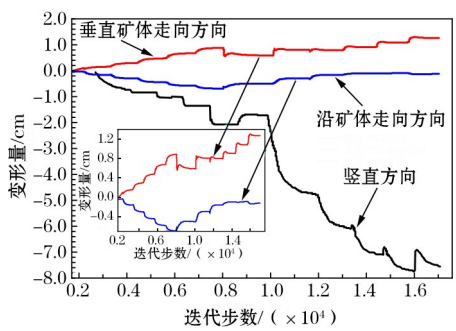


图 16 一步骤采场第一分层充填体变形演化曲线

Fig.16 Deformation evolution curves of the filling body in the first layer of one-step stope

由图 15 可知,随着上向分层矿体的逐层回采,一步骤采场第一分层充填体在竖直方向与垂直矿体走向方向的应力均呈递增趋势。其中,垂直矿体走向方向和沿矿体走向方向应力变化较平缓,竖直方向应力增长较为剧烈,在第六分层回采结束后增至 2 MPa 左右。二步骤采场第一分层矿体回采开始后,一步骤采场第一分层充填体应力出现突变,随后逐渐趋于稳定。这主要是由于二步骤采场矿体开挖削弱了地应力对一步骤采场充填体的约束作用。由图 16 可知,充填体变形随分层回采逐步增大,一步骤采场垂直矿体走向方向和沿矿体走向方向变形较为平缓,而竖直方向变形显著。当进入二步骤采场,“临时矿柱”被开挖导致充填体应力突变,引起较大变形,最大变形量约为 3 cm。综合数值模拟与现场监测结果可知,实测应力及变形规律与模拟结果总体一致。

4 结论

(1) 深部采场充填体在采动扰动作用下的应力演化呈现显著的阶段性特征:在爆破扰动阶段,充填体应力发生瞬时突变,其中竖向应力的最大波动幅度约为 0.02 MPa;待爆破扰动结束后,应力可快速回落并重新趋于稳定。这一现象表明,充填体在采动扰动过程中主要表现为弹性应变特征,具备良好的变形自恢复能力。

(2) 在多层回采过程中,采场内部测点各方向应力均高于外部测点,其中竖直方向应力增幅最为显著,沿矿体走向方向的应力差约为 0.041 MPa,垂直矿体走向方向应力差约为 0.052 MPa。说明内部充填体承担主要载荷,应力集中效应突出。变形监测结果表明,充填体总体呈沉降趋势,竖直方向变形量大于垂直矿体走向方向变形量;采动初期变形速率较快,后期则趋于稳定。

(3) 通过数值模拟进一步探究了一步骤和二步骤采场分层回采过程的应力与变形演化规律,模拟结果与现场监测数据吻合良好。一步骤采场开挖后,二步骤采场矿体充当临时矿柱,应力呈中部集中、上下减弱分布,采场底板出现应力释放区;随分层回采推进,充填体逐步承担上覆载荷。且一步骤采场初期底板底鼓显著,早期充填体沉降变形大,后期则趋于稳定。二步骤采场回采后,一步骤采场充填体应力明显增大,后期与二步骤采场充填体受力基本一致;二步骤采场顶板沉降量显著高于一步骤采场,充填体变形随回采逐层递增,且早期分层充填体变形量大于后期分层。

参考文献(References):

[1] 侯爵,武澄泷,俞贵平,等.胶东金矿集中区深部结构研究进展[J].地球物理学进展,2022,37(3):952-963.
HOU Jue, WU Chenglong, YU Guiping, et al. Research progress on the deep structure of Jiaodong gold deposit concentration area[J].Progress in Geophysics,2022,37(3):952-963.

[2] 周明岭,孙亮亮,吕军阳,等.焦家式金矿勘查与研究[J].地质力学学报,2024,30(5):747-767.
ZHOU Mingling, SUN Liangliang, LYU Junyang, et al. Exploration and scientific research of the Jiaojia-type gold deposit[J].Journal of Geomechanics,2024,30(5):747-767.

[3] 祝培刚,李秀章,张文佳,等.胶东焦家金矿田“三位一体”找矿预测地质模型与深部找矿示范[J].地质通报,2023,42(6):909-920.
ZHU Peigang, LI Xiuzhang, ZHANG Wenjia, et al. The “trinity” prospecting prediction geological model and demonstration of deep prospecting of jiaojia gold field in the Jiaodong area[J]. Geological Bulletin of China,2023,42(6):909-920.

[4] MITCHELL R J, OLSEN R S, SMITH J D. Model studies on cemented tailings used in mine backfill[J]. Canadian geotechnical journal,1982,19(1):14-28.

[5] ABRAHAM H, JOHNSON J C, RAFFALDI M J, et al. Monitoring the in situ performance of cemented paste backfill at the Lucky Friday Mine[C]//12th international conference on mining with backfill 2017: 12th international conference on mining with backfill. Washington: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration,2017:13-26.

[6] 朱斌,高通,涂艾林,等.下向进路倾斜分层胶结充填体稳定性研究[J].矿业研究与开发,2024,44(1):1-12.
ZHU Bin, GAO Tong, TU Ailin, et al. Study on stability of inclined layered cemented backfill in downward drift[J]. Mining Research and Development,2024,44(1):1-12.

[7] 黄旭利,王筱添,景岳,等.基于数值模拟的采场结构参数与充填强度匹配性研究[J].采矿技术,2023,23(3):139-142.
HUANG Xuli, WANG Xiaotian, JING Yue, et al. Study on the matching relationship between stope structural parameters and backfill strength based on numerical simulation[J].Mining Technology,2023,23(3):139-142.

[8] 董志富,翟会超,于永纯,等.大直径深孔落矿嗣后充填采矿工艺采场结构参数数值模拟研究[J].矿业研究与开发,2023,43(6):1-7.
DONG Zhifu, ZHAI Huichao, YU Yongchun, et al. Study on the numerical simulation of stope structural parameters in large-diameter and deep-hole caving with subsequent filling mining process [J]. Mining Research and Development,2023,43(6):1-7.

[9] 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.
WANG Yumeng, GUAN Kai, ZHU Wancheng, et al. Mining-induced surrounding rock instability and surface subsidence based on combination of in-situ monitoring and numerical modelling[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science),2024,45(2):234-243.

[10] LI Genwei, DENG Guangzhe, MA gong. Numerical modelling of the response of cemented paste backfill under the blasting of an adjacent ore stope[J]. Construction and Building Materials,2022,343:128051.

[11] SUN Dequan, WU Quanlin, ZHANG Zhaomi, et al. Sensitivity analysis and numerical simulation study on main controlling factors of surface movement and deformation in strip filling mining under thick unconsolidated layers[J]. Geofluids,2021(1):6615937.

[12] YANG Liujun, CHEN Hou, ZHU Wancheng, et al. Monitoring the failure process of cemented paste backfill at different curing times by using a digital image correlation technique[J]. Construction and Building Materials,2022,346:128487.

[13] 侯新澳,万文,赵延林,等.深部磷矿大断面交叉口软弱围岩稳定性分析及支护方案优化研究[J].矿业研究与开发,2024,44(8):132-138.
HOU Xin'ao, WAN Wen, ZHAO Yanlin, et al. Stability analysis of weak surrounding rock at the intersection with large sectionand optimization of its support schemein the deep phosphate mine[J].Mining Research and Development,2024,44(8):132-138.

[14] ZHANG Huanbao, GAO Tao, WANG Fulin, et al. Evolution of strain field and crack prediction in cemented paste backfill specimens based on digital image correlation and computer vision recognition model[J]. Scientific Reports,2025,15(1):10698.

[15] LI Meng, PENG Yifan, DING Luwei, et al. Analysis of surface deformation induced by backfill mining considering the compression behavior of gangue backfill materials[J]. Applied Sciences,2022,13(1):160.

[16] YIN Yu, YANG Shijiao, HE Yan, et al. Stability assessment of surrounding rock in downward mining route supported by slab-wall backfill structure[J]. Scientific Reports,2024,14(1):13706.