



深部矿体充填开采对上盘斜坡道稳定性影响研究

韩斌^{1,2}, 吴凡^{1,2}, 孟科^{1,2}, 胡亚飞^{1,2}, 吉坤^{1,2}, 骆禧光^{1,2}

(1. 北京科技大学 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083;
2. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083)

摘要: 针对深部矿体充填开采条件下的上盘斜坡道稳定性问题, 通过数值模拟、机理研究与位移监测等手段分析斜坡道稳定性。首先, 采用应力、位移、塑性区三个绝对指标和倾斜、曲率、水平变形三个相对指标评价数值模拟结果以及优化矿体回采方案; 然后, 从地质条件、采矿工艺和充填效果角度探讨斜坡道保持稳定的原因; 最后, 通过现场监测研究斜坡道及采场围岩的位移变化规律。研究结果表明: 不同回采方案开采后, 斜坡道均有良好的稳定性, 且北区、中区矿体最优回采方案分别是方案 1、方案 6; 地质先决条件、采矿工艺科学以及充填效果良好是使得斜坡道稳定的原因; 监测点 1~4 的相对最大位移依次为 3.9mm、2.6mm、5.8mm 和 7.0mm, 未发生明显位移, 斜坡道与采场围岩稳定性良好。

关键词: 深部开采; 上盘斜坡道; 稳定性; 数值模拟; 机理研究; 位移监测

文章编号: 1004-0609(2019)-11-2627-10

中图分类号: TD853

文献标志码: A

围岩体的稳定对保障矿山安全生产至关重要^[1,2]。目前, 国内外专家学者针对开采对岩体稳定性的影响进行了大量研究, M.C. He 等^[3]对安太堡露天煤矿边坡稳定性进行评价以及优化开挖设计; 亓轶等^[4]研究了深部煤层开采对盾构斜井的稳定性影响; A.J. Das 等^[5]通过数值模拟评价了开采中岩层倾角和煤层倾角对围岩稳定性的影响; 李涛等^[6]研究了破碎围岩条件下预留矿柱开采对充填体稳定性的影响; 王振伟^[7]采用相似材料模型试验研究方法, 研究井工开采对露天矿边坡变形破裂过程的影响; Zhou Baojing 等^[8]研究了煤矸石充填后, 沿空留巷自然充填体稳定性; 余伟健等^[9]分析了软弱半煤岩巷围岩的变形机制, 并提出了控制原理与技术。以往研究中, 大多以露天边坡、围岩与重要井巷工程为主要对象。随着露天及地下浅部矿产资源的不断开采, 金属矿深部开采将成为常态^[10-12], 为保证矿山的安全、高效生产, 通常采用充填采矿法进行开采^[13,14], 因此研究深部矿体充填开采对岩体稳定性的影响是大多数地下矿山生产面临的重要课题。本文以吉林某金矿为工程背景, 由于特殊的地质条件将斜坡道布置于矿体上盘, 采用数值模拟、机理研究以及位移监测等方法, 研究深部矿体充填开采对上盘斜坡道稳定性的影响, 研究结果可为其他同类型矿山

安全开采提供理论指导。

1 工程概况

1.1 矿区开采背景

某金矿主要采用斜坡道开拓方法和分段空场嗣后充填采矿法进行开采, 原设计的开拓、采准工程均布置在矿体下盘, 但在矿山实际建设时发现矿体下盘溶洞区非常发育, 上盘岩体稳定性良好, 因此经设计变更后将斜坡道等井巷工程布置在矿体上盘。矿体的直接围岩为硅化构造角砾岩, 上盘围岩为钓鱼台组石英砂岩, 岩层结构完整, 为厚层状的坚硬岩石。矿体下盘岩石为珍珠门组大理岩, 为半坚硬—坚硬的厚层状岩石, 近矿围岩多为构造角砾岩, 虽然在成矿过程中有一定程度的硅化胶结, 有的地段可能不甚稳固。

该矿中区、北区矿石资源储量 264 万吨, 品位 2.5g/t, 占保有资源储量的 71%, 可产生约 1.6 亿的经济效益, 但开采中区、北区矿体时可能会影响到主斜坡道的稳定性。为减少开采对斜坡道稳定性的影响, 在中区、北区保留两个矿体, 先期回采其他区域矿体后, 之后再回采这两个矿体, 以最大限度减少对斜坡道的扰动。随着开采资源减少, 中区和北区成为今后开采的重点对象, 因此安全、高效开采这两大矿体对

通信作者：韩斌，副教授，博士；电话：13241806882；E-mail: hanb666@163.com

维持斜坡道稳定性及整个矿山的安全生产至关重要。

1.2 岩体稳定性

基于矿区地质勘探钻孔,开展了工程地质调查,采用 RMR 值法和 Q 值法分别计算中区和北区的深部岩体 RMR 值与 Q 值,如表 1 所示。

表 1 深部岩体 RMR 值与 Q 值

Table 1 RMR value and Q value of deep rock mass

Distance from ore body	10m		20m	
	RMR	Q	RMR	Q
central area	51	5.2	50	5.6
north area	56	5.5	57	5.3

文献[15]表明,当 RMR 值在 40~60 或 Q 值在 1~10 时,岩体属于中等岩体。由表 1 可知,中区和北区的深部岩体可视为中等较为稳定的岩体。

表 2 岩体力学性能参数

Table 2 Mechanical property parameters of rock mass

rock sample	tensile strength /MPa	uniaxial compressive strength/MPa	elastic modulus /Gpa	poisson ratio	cohesion /MPa	internal-friction angle/°
breccia	5.61	35.16	8.87	0.19	6.74	41
sandstone	5.55	34.87	18.81	0.22	7.13	32.5
filling-body	0.16	1.27	1.02	0.3	0.23	30

2.1 斜坡道稳定性评价指标

2.1.1 绝对指标

基于数值模拟,采用斜坡道所处的应力、位移、塑性区三个绝对指标,用以评价斜坡道的稳定性。一般而言,如果巷道所在的支护体和围岩承受的应力未出现过大的应力集中,则认为巷道是稳定的;《采矿设计手册》规定:如果顶底板和两帮相对收敛不超过 12-36mm 则认为巷道是稳定的;对于塑性区指标,如果数值模拟的过程中巷道围岩未出现贯通性的塑性区,则认为稳定的^[16]。

2.1.2 相对指标

地下开采引起的上覆岩层及地表移动变形会直接影响地表建筑物,《采矿设计手册》规定:临界变形

1.3 岩体力学性能

为准确获得开展数值模拟所需的岩体参数,室内前期对角砾岩、砂岩和充填体开展了劈裂拉伸试验、单轴压缩及变形试验与三轴压缩试验,并用 Roclab 软件将岩石的力学参数折减为岩体力学性能参数,如表 2 所示。

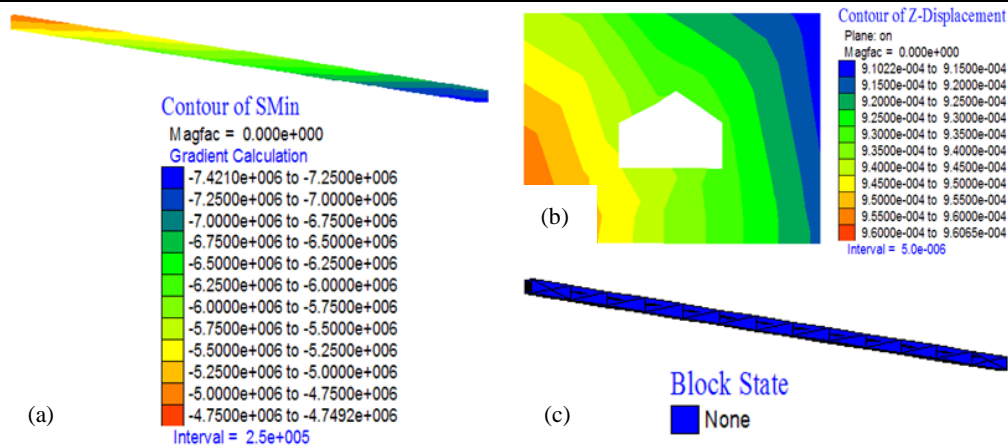
2 数值模拟

为了研究中区、北区深部矿体充填开采对上盘斜坡道稳定性的影响,建立了包括矿体和斜坡道在内的真三维模型。采用 ANSYS 软件进行三维数值建模,并导入 FLAC3D 软件进行分析计算,将岩性简化为砂岩、角砾岩和充填体三种介质类型,材料视为理想弹塑性,本构模型为 Mohr-Coulomb 准则。

值即无需维修就能保持建筑物及各种设施正常使用所允许的地表最大变形值,对于一级建筑物,其倾斜、曲率以及水平变形临界变形值^[17]分别为:倾斜 $i=3\text{mm/m}$ 、曲率 $K=0.2\text{mm/m}^2$ 、水平变形 $\varepsilon=2\text{mm/m}$ 。由于目前对于采场构筑物临界变形值尚无统一标准,本研究将采用地表建筑物的倾斜、曲率、水平变形三个相对指标,用以评价斜坡道的稳定性。

2.2 已开采矿体模拟反分析

中区 530m 水平以上矿体目前已开采完毕,以其



(a)stress; (b)displacement; (c)plastic zone

图 1 斜坡道的数值模拟结果

Fig. 1 Numerical simulation results of ramp

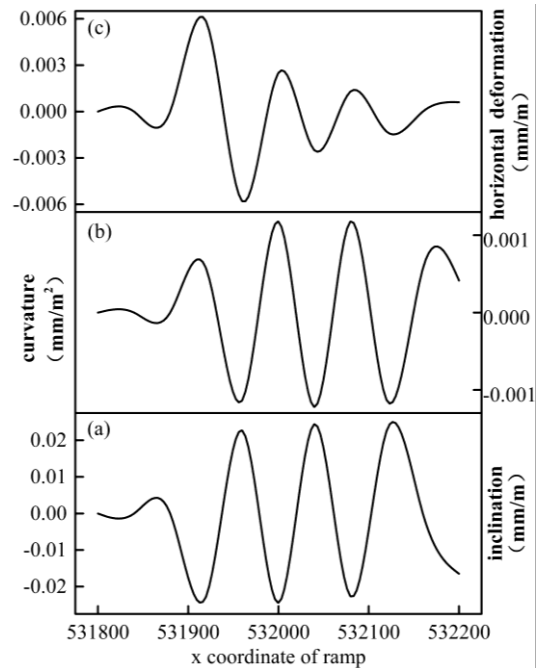
实际开采顺序，通过数值模拟进行分步开挖，分析开采对斜坡道稳定性的影响，并与现场斜坡道稳定性进行对比，校核数值模型的准确性。

2.2.1 绝对指标结果

图 1 所示为斜坡道的数值模拟结果，主要为应力、位移、塑性区三个绝对指标。由图 1 可见：斜坡道的最大主应力 7.421Mpa，未出现应力集中的现象；斜坡道断面沉降不大，相对收敛为 0.046mm，未超过规定的相对收敛的下限值；对于塑性区，斜坡道没有贯通破坏区。因此，中区 530m 水平以上矿体的开采对斜坡道稳定性的影响极小，无有害性影响。

2.2.2 相对指标结果

图 2 所示为斜坡道的相对指标结果，主要为倾斜曲线、曲率曲线以及水平变形曲线。由图 2 可见：中区 530m 水平以上矿体开采后，斜坡道最大倾斜值为 0.023mm/m，最大曲率值为 0.012mm/m²，最大水平变形为 0.006mm/m，变形值均较小，未超过临界变形值。因此，中区 530m 水平以上矿体的开采基本不会影响斜坡道的稳定性。



(a)inclination; (b)curvature; (c)horizontal deformation

图 2 斜坡道的相对指标结果

Fig. 2 Relative index results of ramp

2.2.3 综合分析

由 2.2.2 节可知：斜坡道的围岩变形值均未超过临界变形值，但各中段均有沉降区域。与曲率值和水平变形值相比，倾斜值相对偏大，选取倾斜值为衡量指标，连接已采矿体的倾斜值为 3mm/m 的临界点，得到已采矿体倾斜临界曲面图，如图 3 所示。由图 3 可见：中区 530m 水平以上矿体开采后，该临界面位于斜坡道与矿体之间，表明斜坡道是稳定的。同时，现场观察表明，该区域斜坡道稳定性良好，未见有巷道

失稳、喷射混凝土大面积开裂等现象, 即中区 530m 水平以上矿体开采对斜坡道稳定性的影响并没有危害。因此, 数值模型的建立和参数的选取是合理的, 数值模拟结论可以采用, 具有很高的可信度; 矿体厚度有限、岩体质量好、充填体强度高综合原因, 开采对斜坡道稳定性的影响有限。

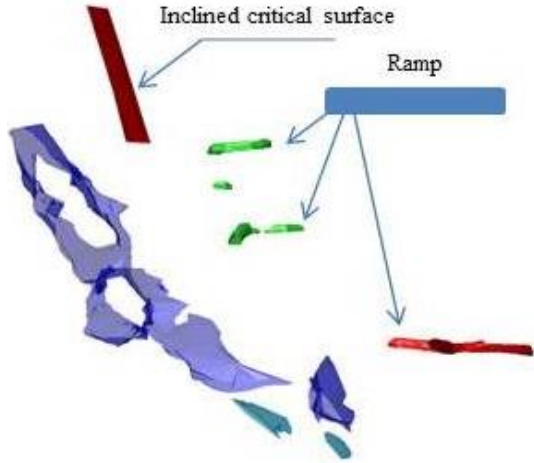


图3 已采矿体倾斜临界曲面图

Fig. 3 Slope critical surface of mined body

2.3 深部矿体开采数值模拟

2.3.1 矿体回采方案

为进一步研究未开采的深部矿体充填开采对上盘斜坡道稳定性的影响, 对中区、北区深部矿体不同开采方案进行数值模拟, 评价斜坡道稳定性, 并优化回采方案。矿体回采方案如表3所示, 其中回采方法1为全中段矿房—矿柱回采, 回采方法2为各分段矿房—矿柱回采。

表3 矿体回采方案

Table 3 Mining plan of ore body

scheme	area	horizontal pillar	mining method
1	north area	yes, 30m	1
2			2
3		no	1
4			2
5	central area	no	1
6			2

限于篇幅, 本文只针对方案1的回采顺序进行详细说明。方案1将矿体划分为矿房、矿柱和水平矿柱, 其开采结构形态如图4所示, 矿房、矿柱宽度均为20m, 高度为15m或30m, 长度等于矿体的厚度或矿体厚度的1/2, 水平矿柱高度为30m, 位于365m水平至395m水平之间。矿体开采顺序为先采335m水平至440m水平的矿体, 后采245m水平至335m水平

的矿体, 两中段矿体回采顺序均为先采矿房后采矿柱。待回采充填结束后, 北区矿体形成上、下为充填体, 中间为水平矿柱的支撑体系。

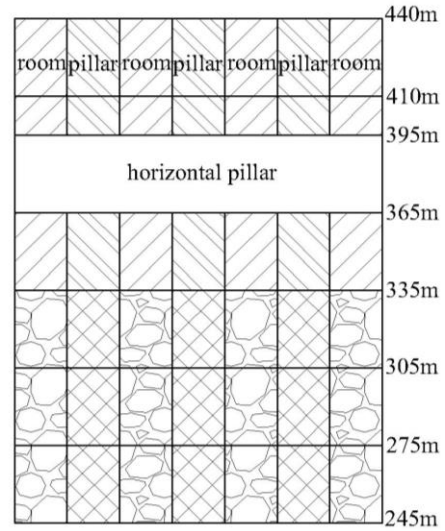
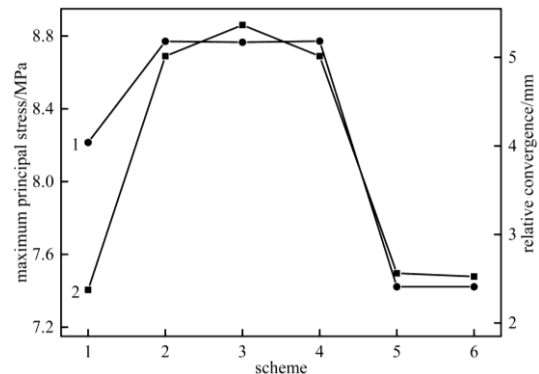


图4 矿体开采结构形态

Fig. 4 Mining structure of ore body

2.3.2 绝对指标结果与分析

对6种回采方案进行数值模拟, 发现不同方案下的斜坡道的最大主应力与相对收敛有所不同, 但均未出现贯通性的塑性区, 最大主应力与相对收敛的数值模拟结果如图5所示。



1—maximum principal stress; 2—relative convergence

图5 6种方案的数值模拟结果

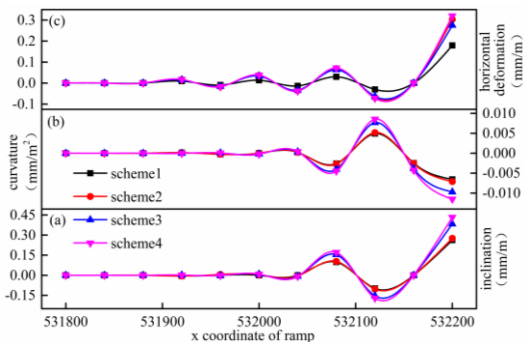
Fig. 5 Numerical simulation results of six schemes

由图6可见: 对于北区深部矿体, 方案1—4斜坡道的最大主应力范围在8.2到8.8MPa之间, 均未出现明显的应力集中; 方案1—4斜坡道的相对收敛范围在2.2到5.4mm之间, 比规定的相对收敛的下限值稍大, 但均未超过上限值; 4种方案中, 方案1的最大主应力与相对收敛最小, 对斜坡道的扰动最小; 同时, 各方案均无贯通性的塑性破坏区, 因此4种方案都不会影响斜坡道的稳定性, 方案1可作为最优方案开采北区深部矿体。对于中区深部矿体, 方案5、6对应斜坡

道的最大主应力分别为 7.422MPa、7.422MPa，无应力集中现象；方案 5、6 对应斜坡道的相对收敛分别为 2.562mm、2.525mm，稍大于规定的相对收敛的下限值，但远小于上限值；同时，2 种方案都未发生塑性破坏，不会影响斜坡道的稳定性，均可开采中区深部矿体。

2.3.3 相对指标结果与分析

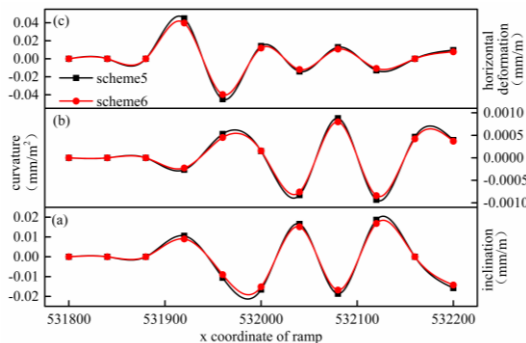
图 6 所示为不同方案回采北区矿体后斜坡道的相对指标。由图 6 可见：方案 1—4 斜坡道的最大倾斜值分别为 0.263mm/m、0.276mm/m、0.383mm/m、0.433mm/m，最大曲率值分别为 0.0066mm/m²、0.0071mm/m²、0.0097mm/m²、0.0115mm/m²，最大水平变形值分别为 0.179mm/m、0.304mm/m、0.275mm/m、0.320mm/m，均未超过规定的临界变形值，开采北区深部矿体不会影响斜坡道的稳定性；在斜坡道所在范围内，相比于其它方案，方案 1 的倾斜、曲率和水平变形最小，可作为最优方案开采北区深部矿体，与绝对指标结果分析一致。



(a)inclination; (b)curvature; (c)horizontal deformation

图 6 北区回采后斜坡道的相对指标

Fig. 6 Relative index of ramp after mining in north area



(a)inclination; (b)curvature; (c)horizontal deformation

图 7 中区回采后斜坡道的相对指标

Fig. 7 Relative index of ramp after mining in central area

图 7 所示为不同方案回采中区矿体后斜坡道的相对指标。由图 7 可见：方案 5、6 回采后，斜坡道的最

大倾斜值分别为 0.0186mm/m、0.0168mm/m，最大曲率值分别为 0.0009mm/m²、0.0008mm/m²，最大水平变形值分别为 0.044mm/m、0.039mm/m，均远小于临界变形值，开采中区深部矿体不会影响斜坡道的稳定性，与绝对指标结果相吻合；在斜坡道所在范围内，方案 6 的倾斜、曲率和水平变形的对应峰值略小于方案 5，方案 6 可作为优化方案开采中区深部矿体。

3 机理研究

数值模拟分析表明，中区、北区深部矿体充填开采对上盘斜坡道稳定性的影响十分有限，无有害影响，本节将从地质条件、采矿工艺和充填效果这三方面进行机理研究，探讨分析斜坡道保持稳定的原因。

3.1 地质条件

由 1.2 节可知，矿区岩体属于中等岩体，能够有效维护岩体的总体稳定性和斜坡道等关键井巷工程的安全。同时，中区、北区矿体附近无大型地质构造，矿区主要包括 F100、F102 和 F201 断裂。其中，F100 断裂是成矿前的不整合构造，宽度近 100m，属于二次胶结后的构造；F102 断裂位于中区、北区矿体下盘，且距离矿体较远，约 200 米；F201 断裂距北区矿体 100 多米，为北西向构造，垂直于矿体走向及斜坡道。因此，在开采中区、北区矿体时，不会由于大型地质构造造成斜坡道的不稳定。

3.2 采矿工艺

在开采矿体时，矿体平均厚度只有 25m，回采宽度在 10~50m 之间，回采对围岩的扰动范围小；采用隔一采一或隔二采一的回采顺序，最大限度减少了开采对区域稳定性影响和岩体移动；采场设计、施工过程中，采用马修斯理论评价采场稳定性，大幅降低了采场失稳风险；采用快采快充工艺，采场开采、充填时间缩短为 10 天~30 天，空区暴露时间变短，周围岩体在大变形前就已经完成充填；采用纤维湿喷混凝土支护、机械化安装树脂锚杆支护、鸟笼状钢绞线为核心的长锚索支护等多种国内外最先进的支护手段，有效保证了支护质量。因此，科学的采矿工艺为斜坡道的稳定性发挥了重要作用。

3.3 充填效果

采场接顶率是阻止岩体移动和保护斜坡道的关键因素, 充填完成后采场接顶率高达 90%, 满足矿山接顶要求, 如图 8 所示; 采用废石: 尾砂: 粉煤灰添加体积比为 1:1:1 的配合比进行工业充填, 充填体 28d、56d 和 90d 的单轴抗压强度分别达到 1.2MPa、2.7 MPa 和 3.0MPa, 充填体强度高且随时间的增长还有明显增大的趋势; 充填体弹性模量高, 测定不同时期的充填体, 其弹性模量在 1.94~5.56GPa, 是矿体或围岩弹性模量的 1/10 左右, 能够对围岩的位移和破坏得到有效控制。因此, 良好的充填效果保证了斜坡道的稳定性。



图 8 采场接顶效果

Fig. 8 Effect diagram of stope roof connection

4 位移监测

表 4 监测方案

Table 4 Monitoring scheme

monitoring point	installation area	number	horizontal	drilling depth/m	remark
1	along stringer in hanging wall ramp of central area	2	530m	20	distance is 5 and
2	along stringer in hanging wall ramp of north area	2	440m	20	15m from the orifice
3	hanging wall of 530m-02 stope in central area	2	560m	20	distance is 5 and
4	hanging wall of 335m-03 stope in north area	2	365m	20	15m from the orifice
本次现场监测选用 YH02-G20 型多点位移计测量斜坡道及围岩位移变化, 其技术参数如表 5 所示, 由表 5 可知: 量程大于数值模拟的最大位移量, 灵敏度较高且温度范围广, 因此可认为多点位移计能够准确测量斜坡道与围岩位移变化情况。		nonlinearity	line/polynomial: ≤0.5%F.S		
		sensitivity	0.01%F.S		
		temperature range	-40~80℃		
		borehole size	≥90mm		
		transfer rod	stainless steel measuring rod		

表 5 多点位移计技术参数

Table 5 Technical parameters of multi-point displacement meter

type	YH02-G10
standard range	200mm

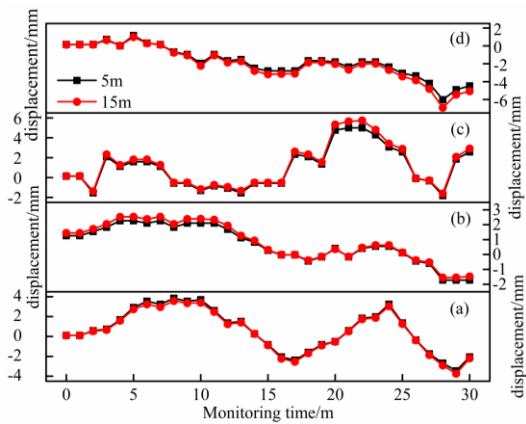
数值模拟与机理研究均表明, 开采深部矿体不会影响上盘斜坡道稳定性。为进一步验证数值模拟与机理研究结果的准确性, 同时考察开采对相邻围岩以及斜坡道的实际影响, 采用位移监测法进行现场监测分析, 并为今后斜坡道等井巷工程的稳定性维护提供超前预测预报信息。

4.1 监测方案

为定量监测采场回采对围岩及斜坡道移动的影响, 将位移监测点布置于斜坡道与采场, 监测方案如表 4 所示。北区、中区矿体开采方案分别选用数值模拟最优结果: 方案 1、方案 6。

4.2 结果与分析

多点位移计安装完成后, 定期 (每月 1 次) 采集数据, 从 2014 年 11 月—2017 年 4 月, 共进行了 30 次数据监测与采集, 各监测点位移变化曲线如图 9 所示。



(a) monitoring point 1; (b) monitoring point 2; (c) monitoring point 3; (d) monitoring point 4

图9 位移监测曲线

Fig. 9 Monitoring curve of displacement

由图9可见：对于相同监测区域，距孔口5m和15m的监测点位移变化规律基本一致，监测效果达到预期要求，监测结果真实可靠；对于中区、北区矿体上盘斜坡道，随着时间的增加，曲线趋于平稳，整体位移波动幅度分别在-3.8~3.9mm、-1.8~2.6mm内；对于中区、北区采场，随着时间的增加，在采场回采结束时相对位移达到最大，但随充填其相对位移逐渐减小，整体位移波动幅度分别在-1.9~5.8mm、-7.0~1.2mm内；与斜坡道相比，采场围岩位移变化波动次数多且幅度大，主要是由于相邻采场开采影响以及斜坡道与采场距离较远造成的；总体而言，各位移监测点变化幅度不大，无明显的位移变化，斜坡道与采场围岩具有良好的稳定性。

5 结论

1) 数值模拟结果表明：绝对指标与相对指标均认为不同回采方案下的斜坡道是稳定的，综合分析确定北区、中区深部矿体最优回采方案分别是方案1、方案6。

2) 机理研究分析表明：矿区岩体为中等岩体且附近无大型地质构造，开采扰动小、回采合理且巷道支护手段强，采场接顶率高以及充填体强度与弹性模量高，是保持斜坡道稳定的主要原因。

3) 位移监测结果表明：中区、北区矿体上盘斜坡道位移波动幅度分别在-3.8~3.9mm、-1.8~2.6mm内，中区、北区采场位移波动幅度分别在-1.9~5.8mm、-7.0~1.2mm内，各监测点无明显位移，斜坡道与采场围岩稳定性良好。

REFERENCES

- [1] 张飞, 杨天鸿, 胡高建. 复杂应力扰动下围岩稳定性评价与采场参数优化[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2018,39(05):699-704.
ZHANG Fei, YANG Tianhong, HU Gaojian. Stability Evaluation of Surrounding Rock and Parameter Optimization of Stope Under Complex Stress Disturbance[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2018,39(05):699-704.
- [2] 张鹏海, 杨天鸿, 郑超, 于庆磊, 刘洪磊, 王培涛. 基于采动应力场与微震活动性的岩体稳定性分析[J]. 煤炭学报, 2013,38(02):183-188.
ZHANG Penghai, YANG Tianhong, ZHENG Chao, YU Qinglei, LIU Honglei, WANG Peitao. Analysis of surrounding rock stability based on mining stress field and microseismicity[J]. Journal of China Coal Society, 2013,38(02):183-188.
- [3] HE M C, FENG J L, SUN X M. Stability evaluation and optimal excavated design of rock slope at Antaibao open pit coal mine, China[J]. INTERNATIONAL JOURNAL OF ROCK MECHANICS AND MINING SCIENCES, 2008, 45(3):289-302.
- [4] 元轶, 刘保国, 史小萌, 王葵. 深部煤层开采对盾构斜井的稳定性影响研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018,37(S1):3584-3592.
QI Yi, LIU Baoguo, SHI Xiaomeng, WANG Yan. Stability study of inclined shield tunnels under deep mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2018,37(S1): 3584-3592.
- [5] DAS A J, MANDAL P K, BHATTACHARJEE R, TIWARI S, KUSHWAHA A, ROY L B. Evaluation of stability of underground workings for exploitation of an inclined coal seam by the ubiquitous joint model[J]. INTERNATIONAL JOURNAL OF ROCK MECHANICS AND MINING SCIENCES, 2017,93:101-114.
- [6] 李涛, 吴爱祥, 吕志文, 韩斌, 刘超, 孙伟. 破碎围岩条件下预留矿柱开采对充填体稳定性的影响[J]. 金属矿山, 2016(01):25-28.
LI Tao, WU Aixiang, LU Zhiwen, HAN Bin, LIU Chao, SUN Wei. Influence of Mining Reserved Pillar on Backfill Body Stability in Broken Rocks[J]. Metal Mine, 2016(01):25-28.
- [7] 王振伟. 井工开采对露天矿边坡稳定性影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2014,35(07):1843-1848.
WANG Zhenwei. Experimental study of impact of

- underground mining on stability of open pit slope[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014,35(07):1843-1848.
- [8] ZHOU B, XU J, ZHAO M, et al. Stability study on filling body in gob-side entry retaining filled by falling gangue naturally[J]. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2012,22(3):423-427.
- [9] 余伟健, 冯涛, 王卫军, 刘海, 马平原, 王平, 李瑞豪. 软弱半煤岩巷围岩的变形机制及控制原理与技术[J]. *岩石力学与工程学报*, 2014,33(04):658-671.
- YU Weijian, FENG Tao, WANG Weijun, LIU Hai, MA Pingyuan, WANG Ping, LI Ruihao. Deformation mechanism, control principle and technology of soft halfcoal rock roadway[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014,33(04):658-671.
- [10] YANG Z. Key Technology Research on the Efficient Exploitation and Comprehensive Utilization of Resources in the Deep Jinchuan Nickel Deposit[J]. *ENGINEERING*, 2017,3(4):559-566.
- [11] FAIRHURST C. Some Challenges of Deep Mining[J]. *ENGINEERING*, 2017,3(4):527-537.
- [12] 李夕兵, 周健, 王少锋, 刘冰. 深部固体资源开采评述与探索[J]. *中国有色金属学报*, 2017,27(06):1236-1262.
- LI Xibing, ZHOU Jian, WANG Shaofeng, LIU Bing. Review and practice of deep mining for solid mineral resources[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2017,27(06):1236-1262.
- [13] 刘艳章, 蔡原田, 张奎, 杨新华, 王刘宝. 露天转地下开采充填体变形参数对边坡稳定性影响研究[J]. *矿冶工程*, 2019,39(01):1-4.
- LIU Yanzhang, CAI Yuantian, ZHANG Kui, YANG Xinhua, WANG Liubao. Influence of deformation parameters of backfill body on slope stability after transition from open-pit to underground[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2019,39(01):1-4.
- [14] 于世波, 杨小聪, 董凯程, 解联库, 孙晓明, 郭利杰. 空场嗣后充填法充填体对围岩移动控制作用时空规律研究[J]. *采矿与安全工程学报*, 2014,31(03):430-434.
- YU Shibo, YANG Xiaocong, DONG Kaicheng, XIE Lianku, SUN Xiaoming, GUO Lijie. Space-time rule of the control action of filling body for the movement of surrounding rock in method of the delayed filling open stoping[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2014,31(03):430-434.
- [15] 陈理想, 陈寿根, 涂鹏, 何涛. 地下洞室围岩分级Q值法、RMR法、BQ法相互关系研究[J]. *路基工程*, 2017(06):107-112.
- CHEN Lixiang, CHEN Shougen, TU Peng, HE Tao. Study on mutual relationships between surrounding rock classifications by Q value, RMR and BQ method for underground cavern[J]. *Subgrade Engineering*, 2017(06):107-112.
- [16] 连清旺. 矿井顶板(围岩)状态监测及灾害预警系统研究及应用[D]. 太原理工大学采矿工艺研究所, 2012.
- LIAN Qingwang. Study on roof(& surrounding rock) state monitoring and the disaster warning system and its application in mine[D]. Institute of mining technology, Taiyuan University of Technology, 2012.
- [17] 付华, 陈从新, 夏开宗, 邓洋洋. 金属矿山地下开采引起岩体变形规律浅析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015,34(09):1859-1868.
- FU Hua, CHEN Congxin, XIA Kaizong, DENG Yangyang. Analysis of rock deformation caused by underground mining of metal mines[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015,34(09):1859-1868.

Study on the influence of deep orebody filling mining on the stability of hanging wall ramp

HAN Bin^{1,2}, WU Fan^{1,2}, MENG Ke^{1,2}, HU Ya-fei^{1,2}, JI Kun^{1,2}, Luo Xi-guang^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education of China for High-efficient Mining and Safety of Metal Mine, University of Science and Technology of Beijing, Beijing 100083, China;

2. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology of Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: In view of the ramp stability of the hanging wall under the condition of deep orebody filling mining, the ramp stability was analyzed by means of numerical simulation, mechanism research and displacement monitoring. First of all, three absolute indexes of stress, displacement and plastic area, and three relative indexes of inclination, curvature and

horizontal deformation were used to evaluate the numerical simulation results and to optimize the mining scheme of the ore body. Then, the reasons for the stability of the ramp were discussed from the perspective of geological conditions, mining technology and filling effect. Finally, the displacement change rules of the ramp and the surrounding rock of the stope were studied through on-site monitoring. The results show that: after mining with different mining schemes, the ramp has good stability, and the best mining scheme of the ore body in the north and the middle areas are scheme 1 and scheme 6 respectively; geological preconditions, scientific mining technology and good filling effect are the reasons for the stability of the ramp; the relative maximum displacement of monitoring points 1-4 is 3.9mm, 2.6mm, 5.8mm and 7.0mm in sequence, without obvious position, and the stability of slope and surrounding rock is good.

Key words: deep mining; hanging wall ramp; stability; numerical simulation; mechanism study; displacement monitoring

Foundation item: Project(2018YFC1900603,2018YFC0604604) supported by the National Key Research and Development Project

Received date: 2020-04-02; **Accepted date:** 2020-06-08

Corresponding author: HAN Bin; Tel: +86-13241806882; E-mail: hanb666@163.com

(编辑 某某某)