

某露天铁矿采坑固结堆存协同挂帮矿 安全高效开采研究

Study on Safe and Efficient Mining on Hanging Wall of Coordinating Cemented
Storage in an Open-pit Iron Mine

毛瑞坤¹, 谢盛青², 赵东升¹

(1. 首钢集团有限公司矿业公司, 河北 迁安 064400; 2. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

摘要:为解决富余尾矿堆存难题,某铁矿南采坑露天开采结束后规划实施生态恢复,挂帮矿体采用地下开采,应用分段空场嗣后充填法。根据某铁矿南采坑的工程地质条件、挂帮矿开采和充填方案,构建了南采坑回填和地下开采的数值模型,分析计算模型的初始状态,模拟了挂帮矿体地下开采的过程。首先依据矿体的开采技术条件,通过采用数值模拟方法研究分析不同岩性下顶板的应力、应变、塑性区等情况评价采场的稳定性,优选合理的采场结构参数;此后模拟分析南采坑回填与不回填工况下对地下开采的影响,揭示了南采坑挂帮矿地下开采不同时期露天边坡、回填体的应力和塑性区的变化规律。通过对不同开采时期的应力和塑性区的综合对比分析后,建议在-60 m中段矿体开采时,应加强对露天边坡和井下采场、巷道的应力及位移的综合监测。

关键词:挂帮矿;数值模型;结构参数;开采顺序;露天边坡

中图分类号: TD854 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2023)03-0013-06

Abstract: In order to solve the problem of surplus tailings stockpiling, ecological restoration is planned and implemented after the end of mining in the south of an iron mine. The hanging wall ore body is underground mining and application of sublevel open stopping with subsequent filling method. According to the engineering geological conditions of the south mining pit, the mining and filling scheme of the hanging wall mine, the dimensional numerical model of the south mining pit filling and underground mining is constructed to analyze the initial state of the computational model and simulate the filling process of the underground mining process of the hanging wall ore body. Firstly, according to the and mining technical conditions of ore body, stress, strain and plastic zone of roof under different lithology were studied and analyzed by numerical simulation method to evaluate the stability of stope and optimize the reasonable stops structural parameters. Finally, the influence of underground mining from backfill and no backfill in the south mining pit is simulated and analyzed. also, the stress and plastic zone changes of the open-pit slope and filling body in the hanging wall mine at different periods of underground mining are revealed. Through the comprehensive comparative analysis of the stress and plastic zone in different mining periods, it is suggested to strengthen the comprehensive monitoring of the stress and displacement of the open-pit slope, underground stope and roadway during the mining of the ore body in the -60 m section.

Key words: hanging wall ore body; numerical model; structural parameters; mining sequence; open pit slope

1 前言

某露天铁矿位于河北省唐山市境内,由南、北相邻两个露天采场组成。矿山尾矿库经过多年放矿运行,剩余库容不足,为解决富余尾矿堆存难题,规划南采坑露天开采结束后复垦造地;北露天采场继续生产,最低开采标高-350 m。由于南采

坑挂帮矿需要采用地采方式开采,散体尾矿不能直接排放到采坑内,选用尾砂固结回填南采坑的技术方案^[1]。考虑到地表不允许塌陷,选用的充填采矿法。本文采用数值模拟方法,对南采坑边坡、坑内充填体、地下开采的稳定性进行分析。通过岩石力学研究,优选合理的采场结构参数和开采顺序方案。

2 南采采坑固结堆存方案

选厂尾矿经泵站输送到隔渣间和干排系统进行选砂和干排后,剩余细粒级尾矿经选厂尾矿大井浓

[作者简介] 毛瑞坤(1983—),男,工程师,采矿工程专业,主要从事采矿技术工作。

[引用格式] 毛瑞坤,谢盛青,赵东升. 某露天铁矿采坑固结堆存协同挂帮矿安全高效开采研究[J]. 中国矿山工程,2023,52(3):13-18.

缩后,输送到深锥浓密机内,经过絮凝沉降,底流给入3台搅拌桶,在搅拌桶内制备成充填料浆,通过管道由充填钻孔自流到南采采坑。浓密机溢流澄清水返回到厂区供选厂使。回填固结的尾砂上部覆土绿化,形成生态景观。

回填顺序:首先沿着西帮坡面回填施工一区充填区域,服务挂帮矿开采施工;再按照类梯田法工艺自北向南分层实施二区充填,利用南采坑南侧排水泵房将充填渗水排出。

3 建立数值模型及分析剖面

南采坑的开采轮廓大致呈锅底状,顶部长600 m,宽500 m,最高标高148 m,最大边坡高166 m左右。开采台阶高度15 m,台阶边坡角大多为 $60^{\circ} \sim 65^{\circ}$,安全平台宽度9~25 m。

南采坑主要矿体为SCS-2,其倾向北西,在西部边坡可见挂帮矿体。矿体上覆岩体主要为斜长片麻岩风化层及第四纪土层,根据三维激光扫描仪对南采坑边坡进行岩体结构面调查,岩体节理面比较发育。

南采坑最低开采标高为-50 m,南采坑境界外矿体赋存标高0~-120 m,为缓倾斜厚大矿体,采用分段空场嗣后充填法。开采顺序为自下向上开采。分为-120 m、-60 m两个开采中段,中段高度60 m,分段高度20 m。

根据某铁矿南采坑的工程地质条件、开采设计和回填方案,采用FLAC^{3D}数值软件,建立南采坑的三维数值模型^[2],具体如图1所示。模型X轴长1200 m,Y轴长1200 m,Z轴长约600 m,图中深色表示矿体。

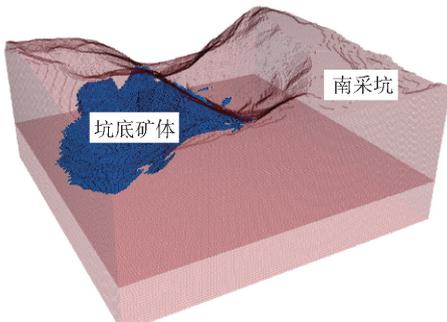


图1 三维数值模型

按照南采坑回填治理方案,同时考虑西帮挂帮矿地采开采的需要,对南采坑划分为2个回填区域:靠近西帮的红色回填区域为一区,充填料浆采用28 d强度不低于3 MPa进行回填;绿色回填区域为二区,是南采坑的主充填区域,采用28 d强度不低于0.5 MPa

的充填料浆进行回填,紫色的A-A'垂直剖面定义为分析剖面,在此基础上建立应力分析平面模型^[3]。

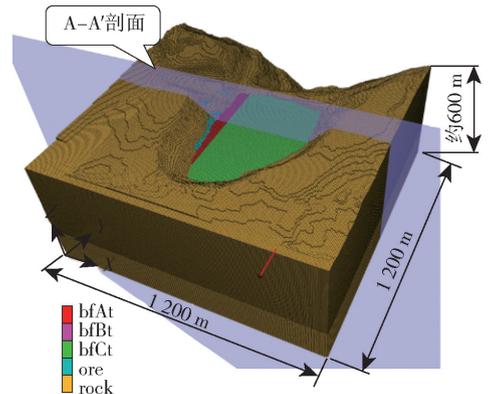


图2 分析剖面位置图

4 选取物理力学参数

在某铁矿矿岩质量评价和充填体物理力学试验结果的基础上,对矿岩的物理力学参数进行相应的折减,模拟计算采用的物理力学参数,具体参数见表1。

表1 物理力学参数表

	密度/ $t \cdot m^{-3}$	内聚力/ MPa	摩擦 角/ $(^{\circ})$	弹性 模量/MPa	泊松比
围岩	2.63	1.3	47	13 346	0.31
矿体	2.81	2.5	48	14 000	0.29
一区充填	1.90	0.45	36	334.11	0.38
二区充填	1.84	0.09	36	30.37	0.42
井下充填	1.90	0.45	36	334.11	0.38

5 开采过程模拟

南采坑终了境界外挂帮矿体分为-120 m、-60 m两个开采中段,采用阶段空场嗣后充填采矿方法首先开采-120 m中段。岩体力学的研究与开采过程密切相关。本文主要围绕以下工作开展:分析计算模型的初始状态,模拟挂帮矿体地下开采的过程。首先通过采用数值模拟方法研究分析不同岩性下顶板的应力、应变、塑性区等情况评价采场的稳定性,优选合理的采场结构参数;此后模拟分析南采坑充填与不充填工况下对地下开采的影响。揭示南采坑挂帮矿地下开采不同时期露天边坡、回填体的应力和塑性区的变化规律。

6 采场结构参数模拟

6.1 初始应力结果

根据矿体特征,矿体倾角为 30° 。采场垂直矿体走向布置,采场最大长度设置为50 m。分别按照

12 m、14 m、16 m、18 m、20 m 的采场宽度进行开挖模拟对比计算^[4],对比分析不同采场结构参数结果,获得合理的采场宽度,保证采场安全。

通过 FLAC^{3D} 软件计算可得到某铁矿矿区原岩应力分布规律。图 3 所示为矿区初始垂直应力分布图。

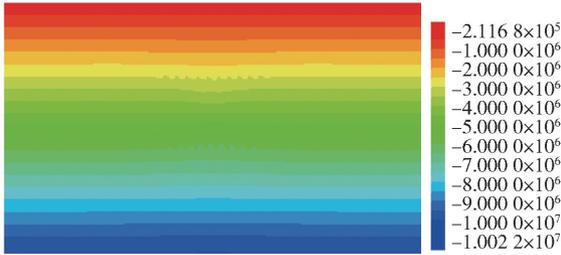


图 3 初始垂直应力图

6.2 开挖后最大主应力结果

根据图 4、图 5 最大主应力结果可知,矿体开挖后,在顶底板的尖角区域易产生应力集中,尤其是当采场宽度越大时,上部覆岩压力逐渐增大,因此在采场四周区域最大主应力呈不断增大的趋势。当采场宽度为 12 m 时,顶底板边缘区域最大主应力为 15.9 MPa;采场宽度为 20 m 时,最大主应力为 20.9 MPa。但整体来看,不同采场宽度下的最大主应力未超过岩体的抗压强度^[5]。

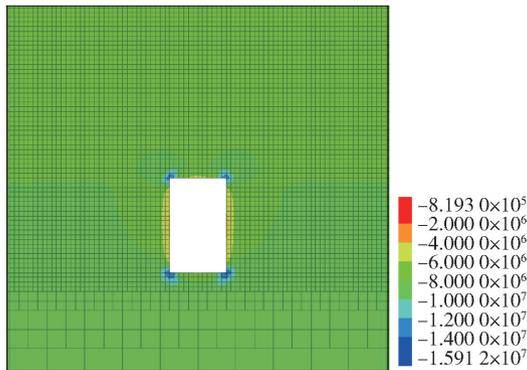


图 4 采场宽 12 m 时的最大主应力

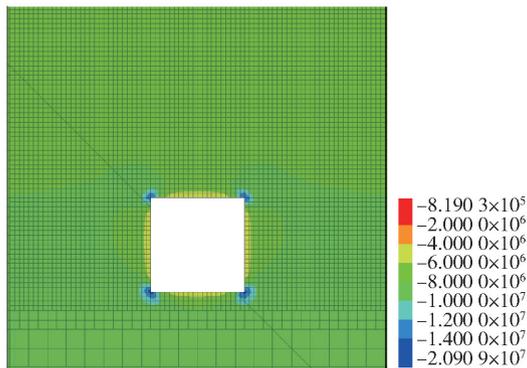


图 5 采场宽 20 m 时的最大主应力

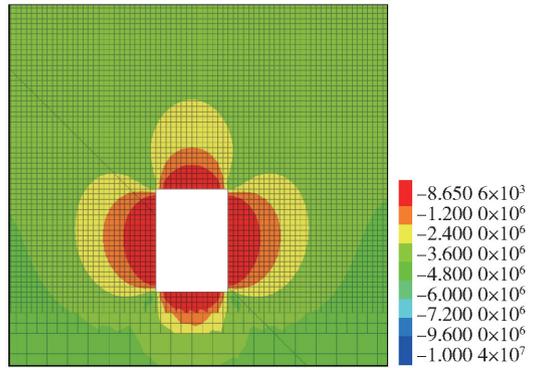


图 6 采场宽 14 m 时的最小主应力

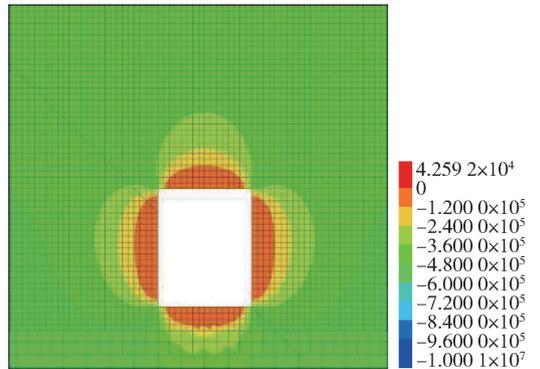


图 7 采场宽 16 m 时的最小主应力

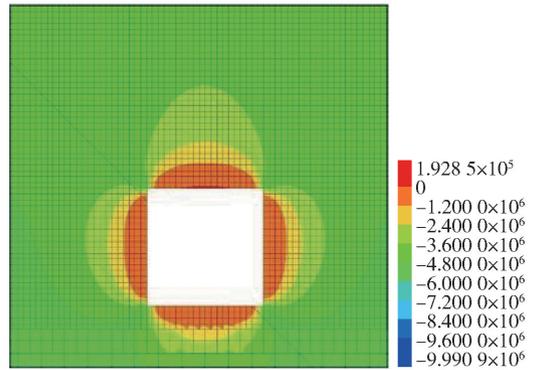


图 8 采场宽 20 m 时的最小主应力

6.3 开挖后最小主应力结果

根据最小主应力图 6、图 7、图 8 结果可知,矿体开挖后,当采场宽度小于 16 m 时,采场顶板没有出现拉应力,即应力值都为负值,为压应力;当采场宽度超过 16 m 后,采场顶板出现了拉应力,当采场宽度为 16 m 时,拉应力为 0.043 MPa;采场宽度达到 20 m 时,采场顶板产生拉应力达到 0.2 MPa。由于岩体抗拉强度明显小于抗压强度,因此在岩体内部受拉时,岩体容易发生受拉破坏;虽然产生拉应力为超过岩体抗拉强度,但由于岩体内结构构造复杂,存

在薄弱区域,建议采纳顶板不产生拉应力方案较佳。因此,根据最小主应力结果,采场顶板宽度应不大于16 m。

6.4 塑性区分析

采场开挖后,采场周边岩体因开挖扰动及应力重分布影响形成一定的松动区,具体如图9、图10、图11、图12所示。当采场宽度为12 m时,采场周边岩体分布零星塑性区,且顶板塑性区没有贯通,说明采场顶板整体处于稳定状态;当采场宽度为14 m时,采场顶板塑性区分布范围有一定增加,但也没有完全贯通,说明采场顶板整体仍处于较稳定的状态;当采场宽度为16 m时,采场周边岩体塑性区分布范围出现较大增长,采场顶板塑性区贯通,说明采场处于临界失稳状态;当采场宽度为18 m时,周边岩体塑性区进一步扩大,且向内部岩体进一步扩展,说明采场逐渐失稳^[6]。

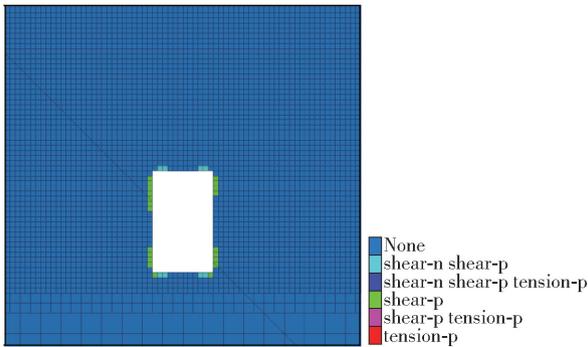


图9 采场宽12 m时的塑性区分布

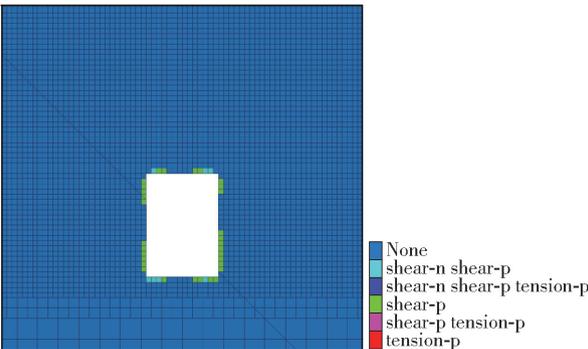


图10 采场宽14 m时的塑性区分布

综上,鉴于南采坑边帮岩体节理面比较发育的实际情况,结合采场结构参数模拟分析,为确保采场安全稳定,建议采场宽度为14 m。

7 南采坑回填前后边坡稳定性分析

7.1 露天结束后的边坡稳定性分析

南采坑最终开采境界的最大主应力场,具体如

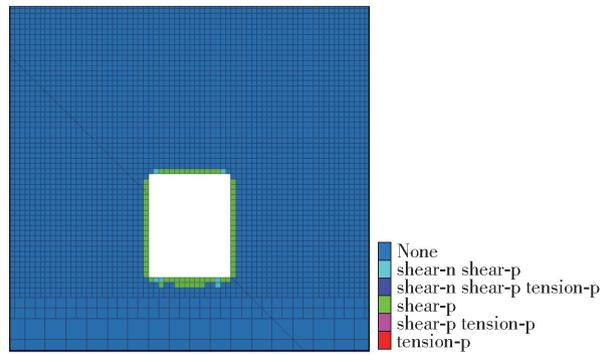


图11 采场宽16 m时的塑性区分布

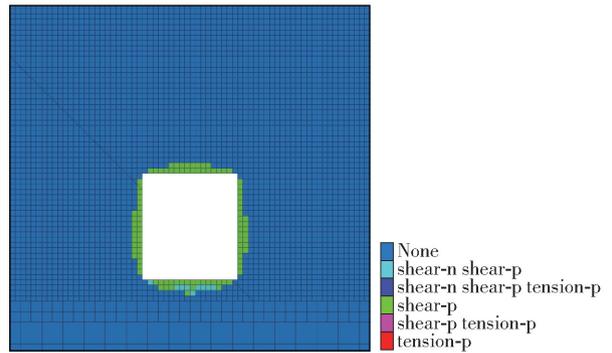


图12 采场宽18 m时的塑性区分布

图13所示。从图中可以看出,随着埋深的增加,最大主应力逐渐增加,模型整体上的应力呈层状分布,边坡临空面应力值相对较低。南采坑最终开采境界的塑性区分布,具体如图14所示。从图中可以看出,南采坑西帮的塑性区主要为剪切和拉伸塑性状态。

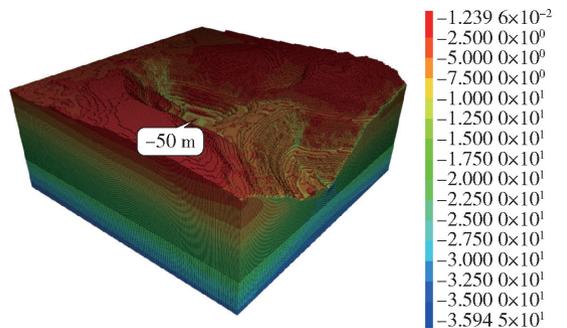


图13 南采坑最终开采境界的最大主应力场

7.2 南采坑回填后的边坡稳定性分析

按照南采坑充填治理方案,考虑到南、北采坑在+34 m联通,南采坑最终回填至+20 m水平。南采坑充填至+20 m时的最大主应力场如图15所示。随着埋深的增加,最大主应力逐渐增加,模型整体上的应力呈层状分布,边坡临空面应力值相对较低。

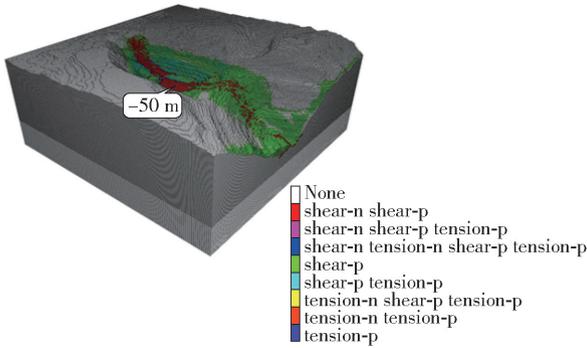


图 14 南采坑最终开采境界的塑性区分布

南采坑内的回填体为低应力状态^[7]。

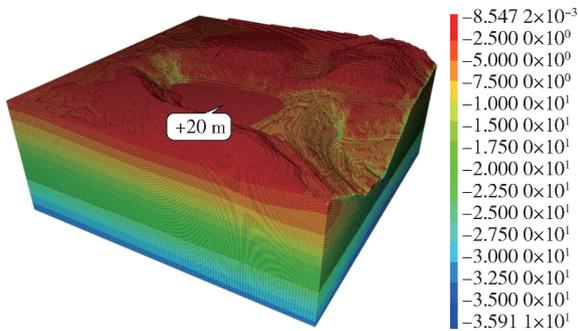


图 15 南采坑回填至 +20 m 时的最大主应力场

南采坑回填至 +20 m 时的塑性区分布,如图 16 所示。南采坑的塑性区主要分布在南采坑的北帮和南帮,主要为剪切塑性状态。通过与图 13、图 14 对比发现,相较于未充填工况,南采坑充填后,塑性区有所减少,说明南采坑充填体能够起到一定的护坡作用。

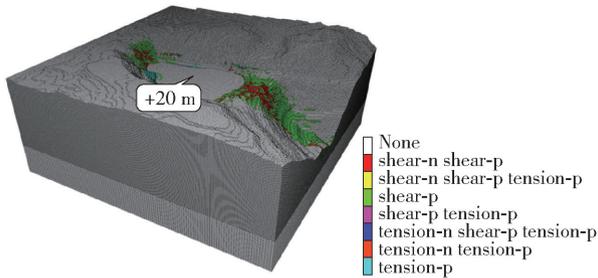


图 16 南采坑充填至 +20 m 时的塑性区分布

8 南采坑回填后地下采场稳定性分析

8.1 -120 m 中段开采后分析剖面的应力变化

-120 m 中段矿体开采后,南采坑西帮的最大主应力场,具体如图 17 所示。从图中可以看出,采空区为低应力状态,采空区的底部和顶部有一定程度的应力集中。南采坑回填体中为低应力状态。

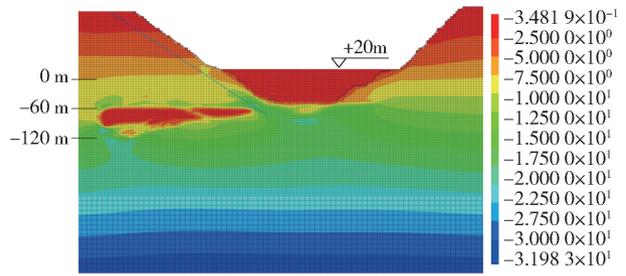


图 17 -120 m 中段开采后的最大主应力场

-120 m 中段矿体开采后,南采坑西帮的垂直应力场,具体如图 18 所示。采空区为低应力状态,采空区西部有一定程度的应力集中。采坑回填体中为低应力状态。

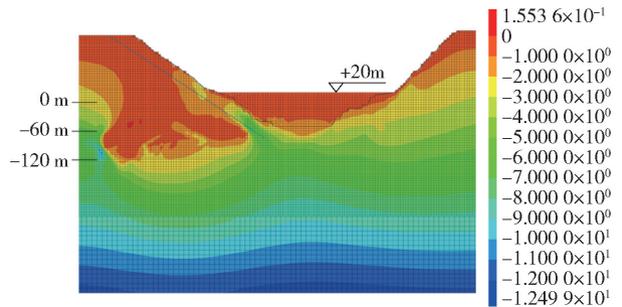


图 18 -120 m 中段开采后的垂直应力场

-120 m 中段矿体开采后,南采坑西帮的塑性区分布如图 19 所示。可以看出,塑性区主要分布于采空区上方和预留矿柱间的三角区域,以及南采坑底部,预留矿柱内有少量塑性区。充填体内未见形成塑性区,说明 -120 m 中段矿体开采对南采坑回填未见明显影响。

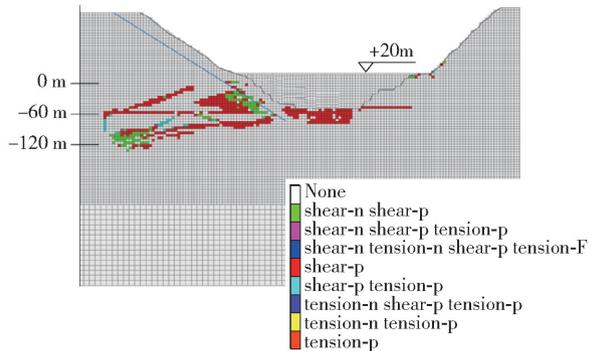


图 19 -120 m 中段开采后的塑性区分布

8.2 -60 m 中段开采后分析剖面的应力变化

-60 m 中段矿体开采后,南采坑西帮的最大主应力场如图 20 所示。可以看出,采空区为低应力状态,采空区西侧的底部和顶部有一定程度的应力集

中。南采坑回填体中为低应力状态。预留顶柱中的应力值约为 12.5 MPa 左右,应力值相比之前有所增加。

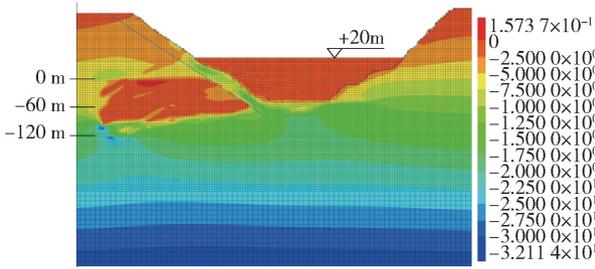


图 20 -60 m 中段开采后的最大主应力场

-60 m 中段矿体开采后,南采坑西帮的垂直应力场,具体如图 21 所示。采空区为低应力状态,采空区西侧角部有一定程度的应力集中。南采坑回填体中为低应力状态。

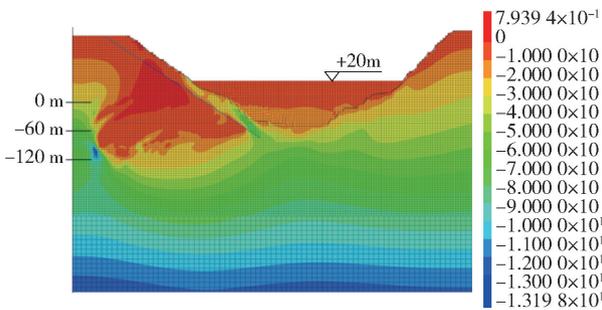


图 21 -60 m 中段开采后的垂直应力场

-60 m 中段矿体开采后,南采坑西帮的塑性区分布,具体如图 22 所示。可以看出,在预留顶柱中形成了塑性区,在南采坑西帮顶部也形成了塑性区,可见在 -60 m 中段矿体开采时,应加强对露天边坡和井下采场、巷道的应力、位移综合监测。充填体内未见形成塑性区,说明 -60 m 中段矿体开采对南采坑回填体未见明显影响^[8]。

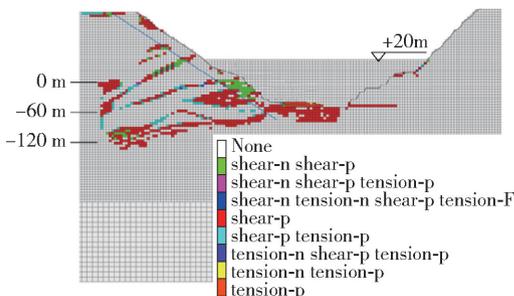


图 22 -60 m 中段开采后的塑性区分布

9 结论

根据某铁矿南采坑的工程地质条件、开采设计和回填方案,构建南采坑充填和地下开采的三维数值模型,开展了对应的模拟计算,结论如下:

(1)南采坑结束开采后,露天边坡塑性区主要为剪切和拉伸塑性状态。南采坑回填后,边坡塑性区有所减少,说明南采坑回填体起到一定的护坡作用。

(2)挂帮矿地下开采期间,相较于回填工况下,南采坑在不回填工况下预留矿柱中的塑性区有所增加,说明南采坑回填能够起到一定的护坡作用,南采坑回填对井下开采未见明显影响。

(3)当采场宽度不超过 16 m 时,采场顶板拉应力较小或不出现拉应力,且采场顶板塑性区没有贯通,采场顶板基本可保持稳定;当采场宽度超过 16 m 时,采场顶板出现明显拉应力,且塑性区分布范围出现较大增长。鉴于南采坑边坡岩体节理面比较发育的实际情况,结合采场结构参数模拟分析,为确保采场安全稳定,建议采场宽度为 14 m。

(4)在 -60 m 中段矿体开采时,应加强对露天边坡和井下采场、巷道的应力、位移综合监测。-60 m 中段矿体开采后,回填体内未见形成塑性区,说明地下矿体开采对南采坑回填体未见明显影响。

[参考文献]

[1] 王方汉, 缪建成, 曹维勤. 矿山固体废物综合利用的研究与实践[J]. 矿业快报, 2003(8): 12-14.

[2] 何晖宇, 李春雷. 边坡稳定性分析理论和研究方法的发展与现状[J]. 交通科技, 2008(4): 65-67.

[3] 郜君. 基于 FLAC3D 的某电站边坡稳定计算参数分析[J]. 东北水利水电, 2018, 36(9): 37-39.

[4] 刘恩彦, 张钦礼, 吴鹏, 等. 后观音山铁矿采场结构参数优化研究[J]. 金属矿山, 2011, 423(9): 33-35.

[5] 丁勇春, 王建华, 徐斌. 基于 FLAC3D 的基坑开挖与支护三维数值分析[J]. 上海交通大学学报, 2009, 43(6): 976-980.

[6] 陈育民, 徐鼎平. FLAC/FLAC3D 基础与工程实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.

[7] 李海波, 蒋会军, 赵坚, 等. 动载荷作用下岩体工程安全的几个问题[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1): 1887-1891.

[8] 郜君. 基于 FLAC3D 的某电站边坡稳定计算参数分析[J]. 东北水利水电, 2018, 36(9): 37-39.