

# 充填法开采挂帮矿对某露天铁矿采场边坡的影响

张立丰 张建双 米红军

中冶沈勘工程技术有限公司 辽宁 沈阳 110015

**摘要:** 简要介绍某露天铁矿现状及其设计情况;以该矿山南采区为例,通过广义Hoek-Brown强度准则的工程折减计算,得出数值模拟边坡模型的输入参数;运用FLAC<sup>3D</sup>有限差分数值模拟软件针对不同地震峰值加速度、充填顺序和采场高度条件,分析挂帮矿开采过程对露天采场边坡稳定性的影响。本文最终结论是选择上盘和下盘挂帮矿协同开采,充填顺序为隔一采一,采场高度为20m,作为该矿山未来采用充填法开采挂帮矿的指导原则。

**关键词:** 挂帮矿; 充填开采; 有限差分法; 边坡稳定性

随着全球经济的飞速发展,资源的日渐枯竭,这些传统的露天矿山的经济效益正日渐减少,导致许多传统的露天矿山正向更深层的地下开采。当进行地下开采和挂帮矿回收的过程中,如何维护和加固露天矿的边坡,已经变得越来越重要,这是所有露天矿都必须解决的问题。

挂帮矿是指超出露天最低开采标高的矿体,它们的存在会影响到露天矿的安全性,从而导致边坡的稳定性受到影响,甚至可能发生严重的滑坡等次生灾害。因此,在进行露天开采时,必须特别注意安全,确保矿体的安全性,并尽量避免发生这类灾害。挂帮矿开采的主要方式有露天回收和地下开采<sup>[1]</sup>。传统露天回收工艺以扩帮开采为主,这种方式历史悠久,技术成熟,管理简单,因此被大多数矿山所采用。地下开采的重点在于设计初期就应将挂帮矿的回收进行统筹考虑,并在露天开采末期以及露天转地下开采设计和实施的过程中,反复斟酌、修改和完善。此前,地下开采回收挂帮矿的方式在我国实际应用中所占比重较低,但随着地壳浅部矿产资源的日趋枯竭,露天转地下开采正在成为许多露天矿山在综合考虑联采经济合理剥采比条件下的选择时,地下开采也注定会成为未来挂帮矿回收的主流方式。三种常见的地下开采方法是:崩落法、空场法、充填法<sup>[2]</sup>。崩落法在挂帮矿回收的过程中应用较少,主要原因是挂帮矿开采形成的大量采空区对边坡稳定性的影响极为复杂,以至于对挂帮矿开采本身和后续地下开采留设境界顶柱时都造成很大困难;而采用空场法进行挂帮矿回收时则需要将边坡的整体地质条件调查清楚,然后针对矿房和矿柱的尺寸进行充分的数值模拟和工业试验研究,同时还要兼顾生产效率和回收率。即使这样,采用空场法的挂帮矿回收率一般也就是在60%左右。利用地下开采形成的充填系统,采用较为保守的小分段充填方式进行

挂帮矿回收,可以有效控制边坡变形的同时,还可以大大提高矿石的回收率。因此,充填法回收挂帮矿是值得推荐的方式<sup>[3]</sup>。在这篇论述中,我们选择了一个露天的铁矿,并在实际的岩石力学实验中测量了它的力学特征。然后,我们使用Hoek-Brown的强度标准来估算边坡的抗压能力<sup>[4]</sup>。我们使用FLAC<sup>3D</sup>有限元模拟软件<sup>[5]</sup>来模拟边坡在各种环境、回收方法和采掘深度等因素的影响。通过广义Hoek-Brown强度准则的工程折减计算,得出数值模拟边坡模型的输入参数;运用FLAC<sup>3D</sup>有限差分数值模拟软件针对不同地震峰值加速度、充填顺序和采场高度条件,分析挂帮矿开采过程对露天采场边坡稳定性的影响。

## 1 工程概况

鞍山市某露天铁矿已经开采十余年,通过计算联采经济合理剥采比,该矿山确定在未来二十余年的时间里都将继续沿用露天开采的方式。该矿山生产能力为1800万吨/年,其中,北采区生产能力为700万吨/年,南采区生产能力为1100万吨/年,北采区设计最低开采标高为-240米,南采区设计最低开采标高为-276米。露天开采结束之后,该矿山将采用地下开采方式继续开发矿权范围内的铁矿石资源。露天开采最终境界之外的所有矿体都采用地下开采方式进行开采,地下开采设计规模与露天开采设计规模相同。为矿山后续进行地下开采时,能够充分回收挂帮矿资源,同时更好地保障边坡稳定性以及维护部分地表运输线路的安全,该矿山决定采用充填法开采挂帮矿。本文以该矿山南采区为例,针对挂帮矿开采对边坡应力变化、位移变化以及稳定性情况进行数值分析。

## 2 计算原理

FLAC<sup>3D</sup>有限差分数值模拟软件在求解时采用空间离散技术、有限差分技术以及动态求解技术。通过以上三种技术,把连续介质的运动方程转化成为在离散单元节

点上的离散形式的牛顿第二定律，从而这些差分方程可用显式的有限差分技术来进行求解。这种方法不但避免常应变六面体单元常会遇到的位移剪切锁死现象，还使得四面体单元的位移模式可以充分适应一系列本构关系的要求。FLAC<sup>3D</sup>有限差分数值模拟软件中的几个主要方程包括：

(1) 本构方程

FLAC<sup>3D</sup>有限差分数值模拟软件可以用来模拟时间变化的情况，其中，假设速度保持不变，则本构方程的增量表达式可以用下面的公式表示：

$$\Delta\delta_{ij} = H_{ij}(\delta_{ij}, \xi_{ij}\Delta t) \quad (1)$$

式中： $\Delta\delta_{ij}$ 为共旋应力增量， $H_{ij}$ 为一给定函数， $\delta_{ij}$ 为应力增量， $\xi_{ij}$ 为应变率张量。

(2) 节点速率

对于常应变四面体单元， $v_i$ 为线性分布， $n_j$ 在每个面上为常量，节点速率方程的表达式为：

$$v_{i,j} = -\frac{1}{3V} \sum_{l=1}^4 v_l' n_j^{(l)} S^{(l)} \quad (2)$$

式中： $V$ 为四面体的体积， $S$ 为四面体的外表面积， $n_j^{(l)}$ 为外表面的单位法向量分量，上标“ $l$ ”表示节点 $l$ 的变量，上标“ $(l)$ ”表示面 $l$ 的变量。

(3) 运动方程

快速拉格朗日分析以节点为计算对象，在时域内求解。节点运动方程的表达式为：

$$\frac{\partial v_i'}{\partial t} = \frac{F_i'(t)}{m^l} \quad (3)$$

式中： $F_i'(t)$ 为时刻节点在 $i$ 方向的不平衡力分量，可由虚功原理导出， $m^l$ 为节点 $l$ 的集中质量，对于静态问题，采用虚拟质量以保证数值稳定。

(4) 应变、应力

快速拉格朗日分析由速率来求某一时步的单元应变增量，根据应变增量，可由本构方程求出应力增量，进而得到总应力。

(5) 阻尼力

对于静态问题，不平衡力中加入非黏性阻尼，以使系统的振动逐渐衰减直至达到平衡状态（即不平衡力接近零）。

3 参数折减

在1994年，Hoek等人提出了一种新的Hoek-Brown强度准则，它以GSI取代了原有的RMR，其表达式如下：

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + S \right)^a \quad (4)$$

式中， $\sigma_{ci}$ 为岩石块体的单轴抗压强度； $m_b$ 、 $S$ 、 $a$ 均为岩体的Hoek-Brown常数。

在2002年，Hoek大幅提升了94版的标准，重点考虑了爆破损伤与应力释放对围岩结构强度的影响，引入岩体扰动系数 $D$ 对岩体的Hoek-Brown常数 $m_b$ 、 $S$ 、 $a$ 进行修正，同时去掉阈值 $GSI = 25$ 。常数 $m_b$ 、 $S$ 、 $a$ 的计算公式为：

$$\left. \begin{aligned} m_b &= m_i \cdot \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right) \\ S &= \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right) \\ a &= \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left[ \exp\left(\frac{-GSI}{15}\right) - \exp\left(\frac{-20}{3}\right) \right] \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

本文选用最新的02年版广义Hoek-Brown强度准则作为强度折减标准。采用Hoek-Brown强度标准对岩体力学参数进行工程折减时，几个关键参数的工程折减方程可以归纳为以下几个：

(1) 单轴抗压强度工程折减

由于单轴压缩试验中只存在 $\sigma_1$ ，故 $\sigma_3$ 取0。单轴抗压强度工程折减公式为：

$$\sigma_1 = \sigma_{ci} S^a \quad (6)$$

(2) 抗拉强度工程折减

在脆性复合材料中，其单轴的抗拉强度与其双轴的抗压强度相当。抗拉强度工程折减公式为：

$$\sigma_{tm} = \frac{S\sigma_{ci}}{m_b} \quad (7)$$

(3) 内聚力和内摩擦角工程折减

经过深入推导，我们发现，将Hoek-Brown的强度准则的线性部分变换成Mohr-Coulomb的岩石破裂准则，其对应的等效内摩擦角 $\phi_m$ 和黏聚力 $C_m$ 的计算表达式分别为：

$$\phi_m = \arcsin\left[ \frac{6am_b(S + m_b\sigma_{3n})^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b(S + m_b\sigma_{3n})^{a-1}} \right] \quad (8)$$

$$C_m = \frac{\sigma_{ci} [(1+2a)S + (1-a)m_b\sigma_{3n}] \cdot (S + m_b\sigma_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a) \sqrt{1 + \frac{6am_b(S + m_b\sigma_{3n})^{a-1}}{(1+a)(2+a)}}} \quad (9)$$

式中： $\sigma_{3n} = \frac{\sigma_{3max}}{\sigma_{ci}}$ ，Hoek建议对地下工程有：

当考虑整个岩体的行为时，岩体强度 $\sigma_{cm}$ 可以用下列公式表示：

$$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} \frac{[m_b + 4S - a(m_b - 8S)] \cdot (0.25m_b + S)^{a-1}}{2(1+a)(2+S)} \quad (10)$$

(4) 弹性模量工程折减

岩体弹性模量的工程折减可以采用以下公式：

当 $\sigma_{ci} > 100\text{MPa}$ 时，可得岩体弹性模量为：

$$E_m = \left( 1 - \frac{D}{2} \right) \cdot 10^{\frac{GSI-10}{40}} \quad (11)$$

当 $\sigma_{ci} \leq 100\text{MPa}$ 时, 可得岩体弹性模量为:

$$E_m = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} \cdot 10^{\frac{GIS-10}{40}} \quad (12)$$

根据广义Hoek-Brown强度准则以及确定其各系数所

采用的经验公式, 对该矿山矿体和岩体进行力学参数工程折减计算, 并将计算结果作为数值模拟边坡模型的输入参数。

表1 广义Hoek-Brown强度准则工程折减计算得到的矿体和岩体物理力学性质参数

序号	岩性	容重 (kN/m <sup>3</sup> )	弹性模量 (GPa)	泊松比	内聚力 (MPa)	内摩擦角 (°)	抗拉强度 (MPa)
1	磁铁矿	33.83	14.18	0.33	8.76	52.47	5.13
2	含铁石英岩	25.65	10.09	0.27	7.82	25.34	6.17
3	花岗岩	26.57	7.30	0.26	7.27	33.56	6.34
4	绿泥石英岩	25.75	6.81	0.25	6.49	42.16	5.62
5	绿泥石英片岩	24.80	6.24	0.24	6.06	40.30	4.34

#### 4 建立模型

经过改造, 某座矿山由露天开采转为地下开采后, 预计采用阶段空场嗣后充填采矿方法, 其中包括75m的采场长度、20m的采场宽度以及65m的采场高度。此外, 在最低开采标高以上形成的挂帮矿也将采用小分段空场嗣后充填技术, 其中采场长度和采场宽度将继续保持地下开采的设计数据, 而采场高度将在12~20m之间。本文以该矿山南采区7980号勘探线至8215号勘探线之间的露天采场边坡处挂帮矿开采为例, 分别分析自然和爆破振动两种边坡状态, 隔一采一和隔二采一两种回收方式, 12m、15m和20m三种采场高度的条件下, 充填法开采挂帮矿对露天采场边坡的影响情况。本次数值模拟计算将开采和充填矿体下盘-120m标高以上三个小分段的矿体以及矿体上盘-276m标高以上三个小分段的矿体。

由于露天采场边坡形态复杂, 而FLAC<sup>3D</sup>有限差分数值模拟软件本身前处理功能一般, 很难单纯依靠它建立比较准确的露天采场边坡模型。这里我们采用3DMine矿

业工程软件建立露天采场边坡的几何模型, 并将其导入FLAC<sup>3D</sup>有限差分数值模拟软件中进行网格划分、数值计算以及后处理工作。本次数值模拟计算的露天采场边坡模型长×宽×高 = 1200m×100m×600m, 采用Mohr-Coulomb本构模型, 模型X = 0, X = 1200, Y = 0, Y = 100, Z = 0设置为位置固定, Z = 600以及台阶坡面设置为自由边界, 加载方式为自重条件, 共计划分出628808个节点, 560240个网格。

在进行数值模拟计算时, 我们作出以下假设:

- (1) 研究范围内的矿体和岩体为均质、各向同性的弹塑性模型, 岩体破坏遵循Mohr-Coulomb强度准则;
- (2) 在模型中挂帮矿开采和采空区充填的过程中, 忽略大气降水和地下水的影响;
- (3) 在模型中挂帮矿开采和采空区充填的过程中, 忽略开挖和充填时间的影响, 默认开挖和充填是一次性完成的。

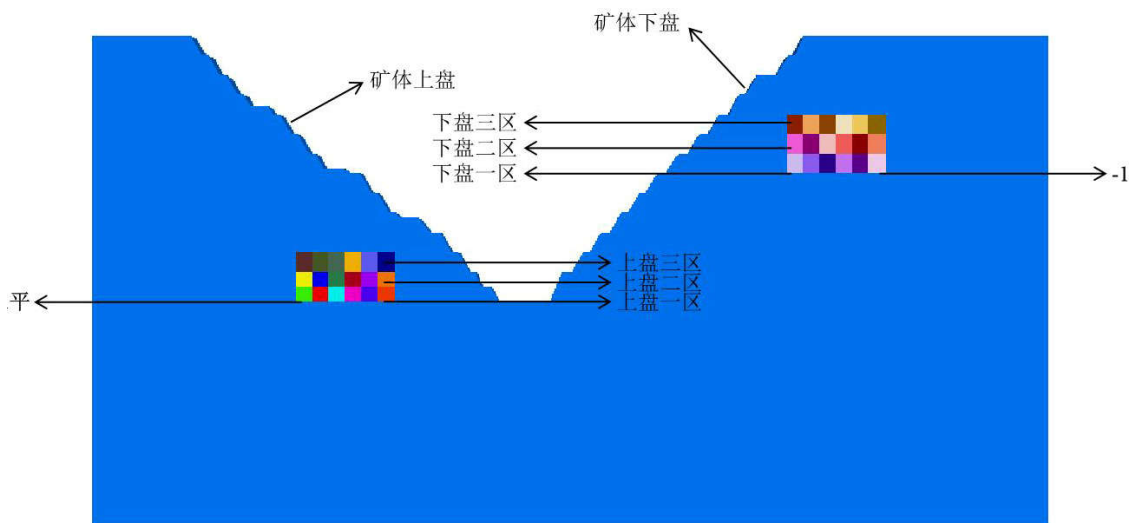


图1 露天采场边坡和挂帮矿数值模型云图

5 结果分析

在进行挂帮矿开采时，最大主应力在39MPa附近，在整个计算过程中基本没有发生大的变化，随着挂帮矿开采和采空区充填的进行略有减小，主要集中在坡面和坡脚；最小主应力在0.55~0.75MPa之间变化，随着挂帮矿开采和采空区充填的进行不断减小，主要集中在陡坡附近和坑底坡脚，呈现为拉应力，小于矿岩体的抗拉强度极限；最大垂直位移在20~30mm附近，沉降量较小，证明在进行地下开采的同时进行挂帮矿开采，或单独进行挂帮矿开采，受挂帮矿开采扰动影响，露天矿局部边坡可能发生位移现象。最大水平位移部位发生在

挂帮开采区域的上一台阶，水平位移的变化量向本级边坡内部和上一级台阶逐渐变小，总体位移趋势是由本级边坡上部台阶和内部向整体露天矿边坡移动；挂帮开采区域上部顶板和平硐入口处发生较为明显的应力释放现象，大面积的应力释放形象导致挂帮开采区域顶部形成不同方向的应力集中，呈层状分布，应力集中累积较大的情况下，有可能会引起挂帮开采区域影响范围内边坡覆岩向露天矿采场区域发生位移，从而影响露天采场边坡的安全稳定性。

5.1 不同边坡状态（地震峰值加速度）条件下开采挂帮矿对边坡稳定性的影响

表2 不同地震峰值加速度条件下开采不同区域挂帮矿露天采场边坡安全系数计算结果

区域边坡安全系数峰值加速度	0.00g	0.05g	0.10g	0.15g	0.20g
上盘一区	1.37	1.33	1.30	1.27	1.23
上盘二区	1.28	1.26	1.24	1.21	1.18
上盘三区	1.22	1.17	1.12	1.09	1.05
下盘一区	1.30	1.25	1.21	1.18	1.15
下盘二区	1.22	1.16	1.10	1.06	1.03
下盘三区	1.12	1.05	1.00	0.96	0.92

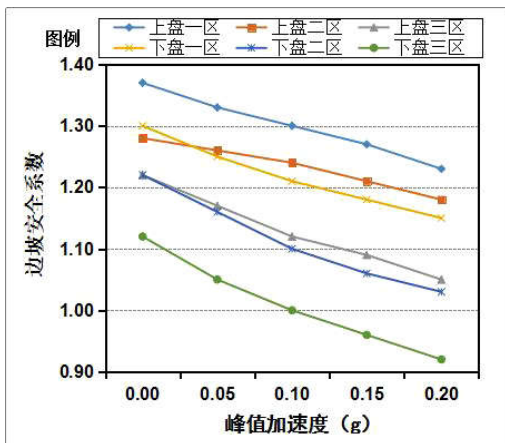


图2 不同地震峰值加速度与边坡安全系数间关系的折线图

从表2和图2中可以看出，①随着地震峰值加速度的变化，露天采场边坡安全系数是随之变化的，变化趋势正好相反，如：开采下盘一区时，峰值加速度为0.00时（即自然状态），安全系数为1.30，而峰值加速度为0.20时，安全系数为1.15；②随着挂帮矿开采区域的不断增加，露天采场边坡安全系数是随之减小的；③开采露天采场下盘的挂帮矿比开采露天采场上盘的挂帮矿对露天采场边坡稳定性的影响更为显著。

表3 不同充填顺序条件下开采不同区域挂帮矿露天采场边坡安全系数计算结果

区域 边坡安全系数 回收方式	隔一采一	隔二采一
上盘一区	1.36	1.38
上盘二区	1.25	1.28
上盘三区	1.20	1.22
下盘一区	1.28	1.30
下盘二区	1.18	1.19
下盘三区	1.10	1.12

5.2 不同回收方式（充填顺序）条件下开采挂帮矿对边坡稳定性的影响

从表3和图3中可以看出，①随着间隔开采距离的增大，露天采场边坡安全系数是随之增大的，如：开采下盘一区时，隔一采一时，安全系数为1.28，而隔二采一时，安全系数为1.30；②同5.1一节；③同5.1一节。

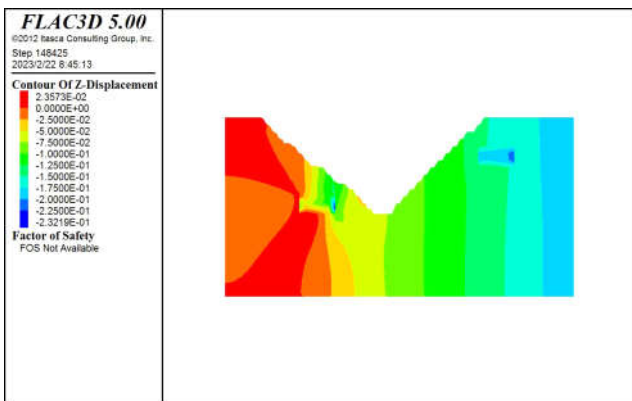


图3 数值模拟结果垂直位移云图  
(第100000步，不平衡比率小于 $1 \times 10^{-5}$ )

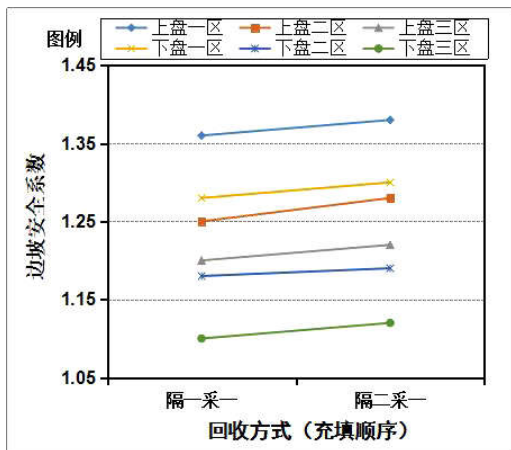


图4 不同充填顺序与边坡安全系数间关系的折线图

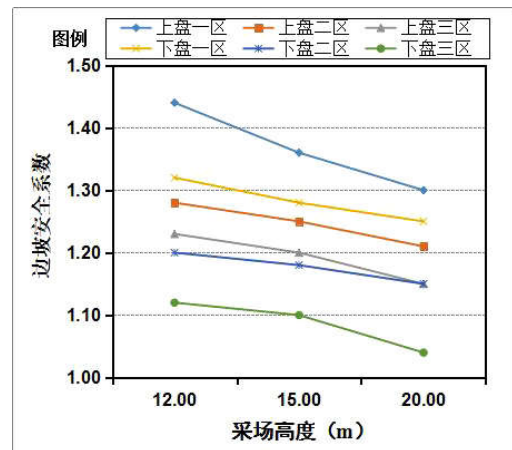


图6 不同采场高度与边坡安全系数间关系的折线图

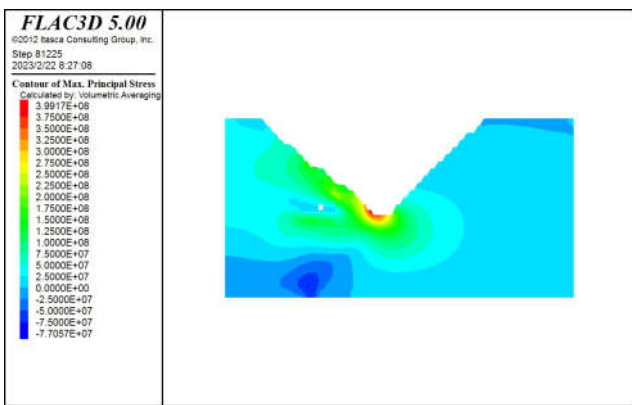


图5 数值模拟结果最大主应力云图

(第100000步, 不平衡比率小于 $1 \times 10^{-5}$ )

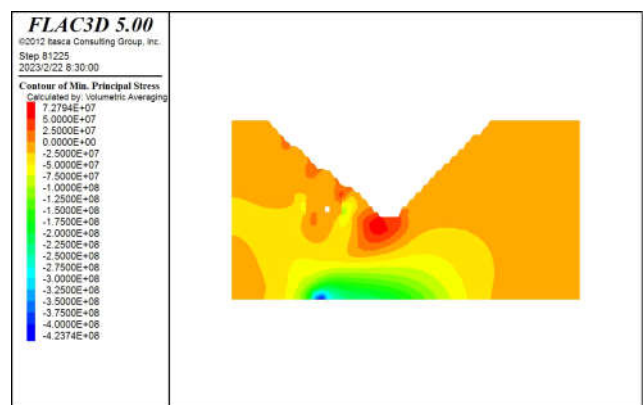


图7 数值模拟结果最小主应力云图

(第100000步, 不平衡比率小于 $1 \times 10^{-5}$ )

### 5.3 不同采场高度条件下开采挂帮矿对边坡稳定性的影响

从表4和图4中可以看出, ①随着采场高度的增大, 露天采场边坡安全系数是随之减小的, 如: 开采下盘一区时, 采场高度为12m时, 安全系数为1.32, 而采场高度为20m时, 安全系数为1.25; ②同5.1一节; ③同5.1一节。

表4 不同采场高度条件下开采不同区域挂帮矿露天采场边坡安全系数计算结果

区域 边坡安全系数 采场高度	12m	15m	20m
上盘一区	1.44	1.36	1.30
上盘二区	1.28	1.25	1.21
上盘三区	1.23	1.20	1.15
下盘一区	1.32	1.28	1.25
下盘二区	1.20	1.18	1.15
下盘三区	1.12	1.10	1.04

### 6 结论

(1) 随着挂帮矿开采区域的不断增加, 露天采场边坡各方向应力值都有一定程度的增加, 但都没有达到边坡矿体和岩体的极限抗拉强度, 也没有产生明显的应力集中现象。因此该矿山在采用充填法开采挂帮矿的过程中, 露天采场边坡仍处在相对稳定的安全状态之中;

(2) 我们可以通过数值模拟结果看出较为普遍的结论: 随着挂帮矿开采区域的不断增加, 露天采场边坡安全系数是随之减小的; 开采露天采场下盘的挂帮矿比开采露天采场上盘的挂帮矿对露天采场边坡稳定性的影响更为显著;

(3) 随着地震峰值加速度的增大, 随着间隔开采距离的减小, 随着采场高度的增大, 露天采场边坡安全系数是随之减小的。其中, 采场高度对露天采场边坡稳定性的影响最大, 地震峰值加速度次之, 间隔开采距离对其影响最小, 非常不显著;

(4) 根据以上结论, 我们将对露天采场边坡稳定性影响最小的采场高度这一变量选为最大的20m, 充填顺序

选为隔一采一，同时上盘和下盘挂帮矿协同开采作为该矿山未来采用充填法开采挂帮矿的指导原则。

#### 参考文献

[1]李宝祥.金属矿床露天开采[M].冶金工业出版社,1992:245.

[2]李海英.露天转地下过渡期协同开采方法与应用研究[D].东北大学,2015.

[3]谭玉叶,杜建华,宋卫东,等.挂帮矿充填法开采对高

陡边坡及采场围岩稳定性的影响[J].工程科学学报,2012,34(7):731-737.

[4]吴顺川,金爱兵,高永涛.基于广义Hoek-Brown准则的边坡稳定性强度折减法数值分析[J].岩土工程学报,2006(11):1975-1980.

[5]魏继红,吴继敏,孙少锐.FLAC~(3D)在边坡稳定性分析中的应用[J].勘察科学技术,2005(02):27-30.