



# 露天采场边坡下隐伏空区灾害影响分析 及其治理

解联库<sup>1,2</sup>, 熊代余<sup>1,2</sup>, 杨天鸿<sup>1</sup>, 万串串<sup>2</sup>, 胡建军<sup>2</sup>

(1. 东北大学资源与土木工程学院, 辽宁沈阳 110004;

2. 北京矿冶科技集团有限公司, 北京 102628)

**摘要:** 采空区是影响矿山安全的重大危险源之一。针对金厂峪矿露天采场隐伏空区, 首先分析了各空区工况条件下露天采场边坡失稳破坏特征, 结果表明: 空区存在时出现应力集中现象和拉剪破坏, 空区顶板失稳造成露天采场边坡局部滑塌, 空区回填后边坡稳定性明显改善; 其次采用类比法、力学理论计算以及极限平衡法校核等, 确定了隐伏空区预处理顶板安全厚度, 形成了一种空区顶板安全厚度的综合判别法。当空区跨度为 12m 时, 顶板安全厚度取 10.5m 合适, 满足类比法及主要工程力学理论的安全要求。在空区分类基础上, 制定了系统的露天采场隐伏空区治理方案, 丰富和发展了露天矿山隐伏空区隐患治理关键技术, 有效指导了露天开采作业, 减少了安全事故的发生。

**关键词:** 隐伏空区; 破坏特征; 顶板安全厚度; 极限平衡法; 综合判别法; 空区治理

**中图分类号:** TD73、TB125

## 0 引言

我国金属非金属矿山采空区总量大, 分布范围广。据统计, 到 2015 年底, 全国金属非金属矿山共有采空区 12.8 亿  $\text{m}^3$ , 分布于全国 28 个省(市、区)。这些采空区也大量分布于我国露天矿山。随着露天开采作业的进行, 空区将严重影响露天矿山作业人员和采矿设备的安全; 露天矿山隐伏空区还严重影响边坡的稳定性, 成为影响矿山安全的重大危险源之一。近年来许多学者在露天矿山空区隐患探测、稳定性分析、顶板安全厚度、治理方式等方面进行了大量研究与实践。美国、日本、欧洲等国家主要采用物探方法进行探测, 我国闫长斌、刘长会等<sup>[1-4]</sup>采用多种物探方法进行空区勘测与相互解释, 取得了

较好的探测效果。薛涛、胡玉玺等<sup>[5-7]</sup>以复杂采空区为研究对象, 采用模糊综合评判法、突变理论、贝叶斯法等对其进行稳定性分级和安全系数研究。柴红保、丁新启等<sup>[8-10]</sup>使用强度折减法、加速混合遗传算法, 研究了露天矿山边坡下不同采空区对边坡的影响机制及影响程度。李元辉、赵兴东等<sup>[11-15]</sup>在极限平衡法、经验公式以及数值模拟分析基础上, 形成了空区顶板安全厚度合理确定方法。胡建军、苏毅苹等<sup>[16-18]</sup>采用数值模拟方法分析了复杂空区群对露天矿山边坡的影响, 并对高陡边坡下充填治理空区的效果进行了评价。刘希灵、邓骐宁等<sup>[19-21]</sup>针对多层复杂空区, 制定了不同的采空区深孔爆破处理方案, 消除了露天矿山空区隐患。近年来国内外广泛

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC1503101)、NSFC-新疆联合基金项目(U1903216)联合资助

收稿日期: 2019-12-27; 修订日期: 2020-04-14

作者简介: 解联库(1972-), 正高级工程师, 博士研究生; 电话: 18612185095; Email: lkxie0118@bgrimm.com

通讯作者: 万串串(1988-), 高级工程师, 硕士; 手机: 13811792534; Email: wanchuanchuan.19@163.com

采用激光测距技术进行采空区精密探测，基于此，宋卫东、罗周全等<sup>[22-26]</sup>提出了空区探测、建模、稳定性分析及治理等一体化关键技术，并在多个矿山得到了较好应用。

目前我国在露天矿山隐伏空区探测、空区治理与监测及空区条件下露天开采等方面取得部分成就，但是针对复杂空区条件，如何安全、高效、低损失贫化地开采露天矿资源同时又有效处理空区、消除安全隐患，仍然有部分亟待解决的技术难题。露天采场边坡下隐伏空区，如果处理措施和时机不当，有可能导致剥采期间空区坍塌而对人员、设备构成安全隐患，有可能发生在服务年限内最终边坡向空区方向滑移失稳破坏。因此，对露天采场边坡下隐伏空区进行预处理十分必要，处理时间与空区顶板安全厚度密切相关，处理效果关乎空区附近边坡的稳定性。同时现有的空区治理方案大多针对特定的矿山地质开采技术条件，缺乏系统性的露天矿山隐伏空区防治对策。针对河北金厂峪矿段露天采场隐伏空区，在钻孔超前探测及三维激光扫描测量等基础上，分析不同空区工况条件下露天采场边坡失稳模式和破坏特征；采用力学理论计算、极限平衡法校核等，确定隐伏空区预处理的顶板安全厚度；在空区分类基础上制定了系统的露天采场隐伏空区治理方案，丰富和发展露天矿山隐伏空区隐患治理关键技术，为类似条件下矿山的工程实践提供借鉴。

## 1 工程概况

金厂峪金矿床产于冀东太古届迁西岩群变质岩系中，矿体集中于中部金厂峪矿段，为急倾斜薄到中厚稳固矿体，主要使用空场法开采。由于地采时间较长，企业面临矿产资源日趋紧张困境，且上部中段部分采空区已坍塌；另一方面，随着工艺技术进步和黄金价格提升，工业指标随之调低，在已采区域周边重新圈定了大量低品位矿产资源。基于此，在大力勘探开发深部及整合矿区周边资源的同时，对 8#勘探线以北、143m 以上的 II、III 号脉残矿及低品位矿拟采用露采方式回收。但是露天采场范围内存在数量众多、位置不明、形态各异的空间法自采空区及盗采滥挖民采空区（见图 1），为保证后期露天开采安全及边坡稳定，需要开展隐伏空区综合探测、露天采场边坡下空区灾害影响分析及其防治。从地质开采资料分析，空区主要沿矿体走向分布，以对露天采场最终边坡影响最大的 514-10 空区为重点研究对象，位于 12#勘探线、183m 台阶东南侧附近，空区宽为 12m，长 50m，采高 183~215m。

## 2 露天采场边坡下隐伏空区灾害影响分析

基于金厂峪矿段现有资料及空区实测分布情况，选择代表性区域建立三维数值计算模型，运用 FLAC<sup>3D</sup> 岩土工程软件进行金厂峪露天采场边坡下隐伏空区灾害影响分析。

2.1 岩体力学参数

费辛柯法、Georgi 法结合边坡开挖高度

等因素，主要考虑岩体节理密度对岩块内聚力进行弱化；经验折减法以岩石力学试验和

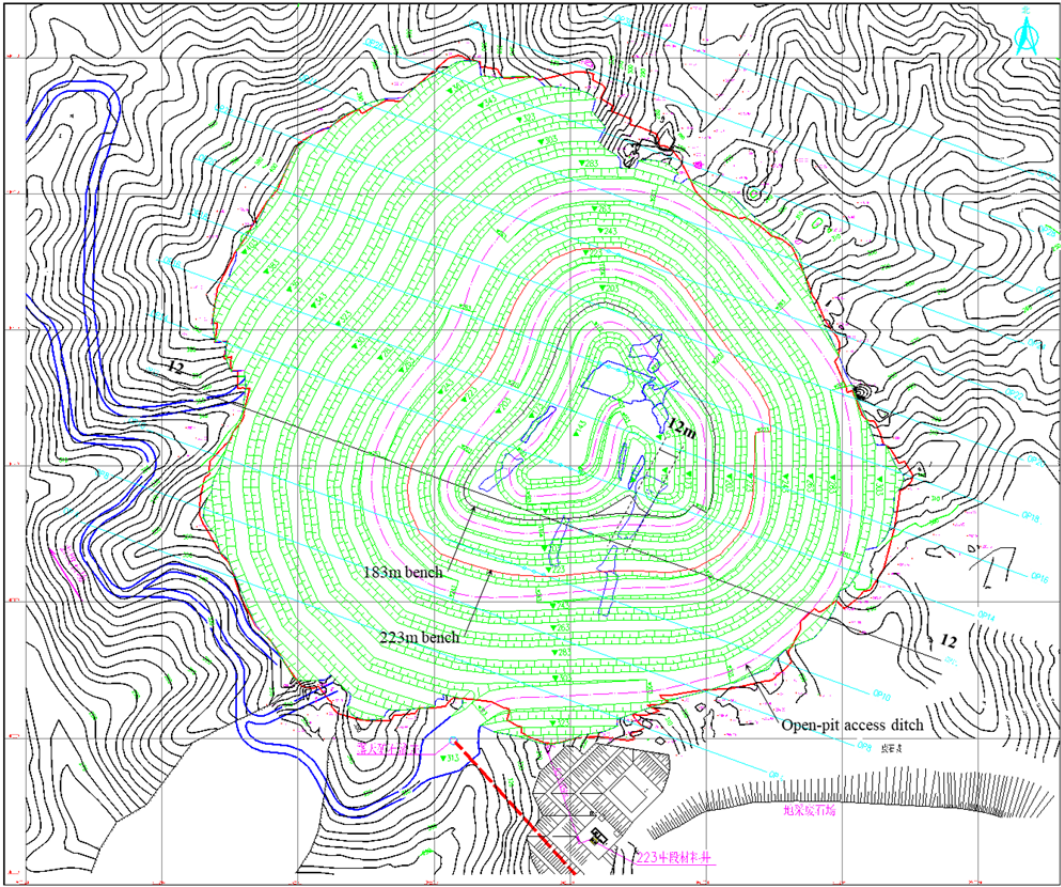


图 1 露天采场设计终了平面图

Fig.1Ending mining planar graph of the original realm

工程地质调查为基础，考虑节理密度对岩体内聚力的影响，将岩块内聚力降低；RMR 建议法是根据 RMR 分类情况推荐岩体抗剪强度参数；简化的结构面-岩石强度对比法基于室内弱面剪切试验，考虑岩性及结构面充填

物等，岩体综合抗剪强度参数应大于弱面抗剪强度参数。在岩石力学试验和工程地质调查基础上，采用上述方法等综合确定岩体抗剪强度指标，具体参数如表 1 所示。

表 1 岩体物理力学参数

Table1Physical and mechanical parameters of rock mass

| Rock type                                | Density<br>/(kg·m <sup>-3</sup> ) | Elastic<br>modulus/GPa | Poisson's<br>ratio | Cohesion<br>/MPa | Friction<br>angle/(°) | Tensile<br>strength/MPa |
|------------------------------------------|-----------------------------------|------------------------|--------------------|------------------|-----------------------|-------------------------|
| orebody<br>schist                        | 2780                              | 14.20                  | 0.251              | 2.230            | 60                    | 1.195                   |
| hanging wall and footwall<br>amphibolite | 2780                              | 11.70                  | 0.255              | 2.100            | 58                    | 2.104                   |

2.2 破坏强度准则

岩体以斜长角闪岩、绿泥石化片岩及绢云母化片岩为主，属于弹塑性材料。数值模

$$f_s = \sigma_1 - \sigma_3 \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} - 2c \sqrt{\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} \quad (1)$$

$$f_t = \sigma_3 - \sigma_T \quad (2)$$

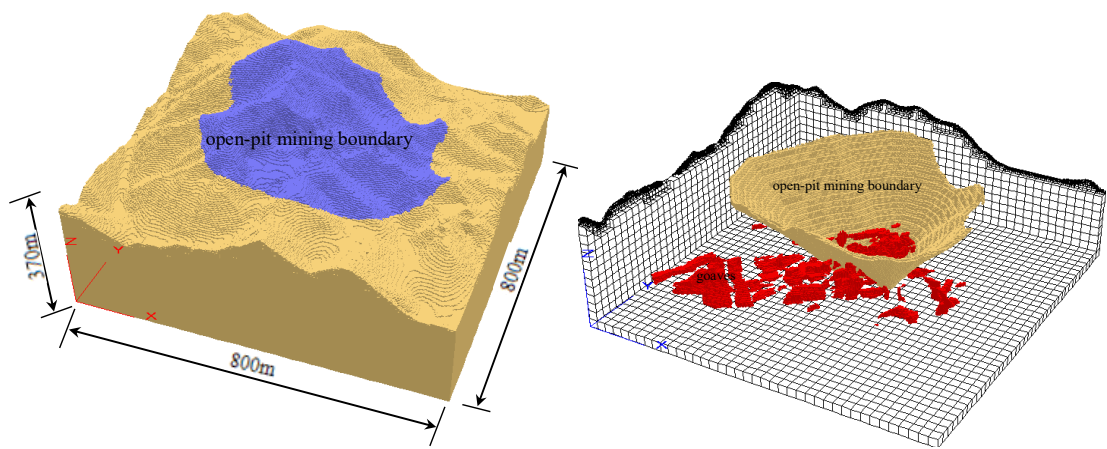
式中： $\sigma_1$ 、 $\sigma_3$  是最大、最小主应力， $c$ 、 $\varphi$  是粘结力、内摩擦角， $\sigma_T$  为单轴抗拉强度。

当  $f_s > 0$  时，材料将发生剪切破坏。岩体的抗拉强度较低，在拉应力状态下，根据  $f_t > 0$  判断岩体是否产生拉破坏。

### 2.3 三维数值模型

拟计算采用摩尔-库伦（Mohr-Coulomb）屈服准则判断岩体的破坏：

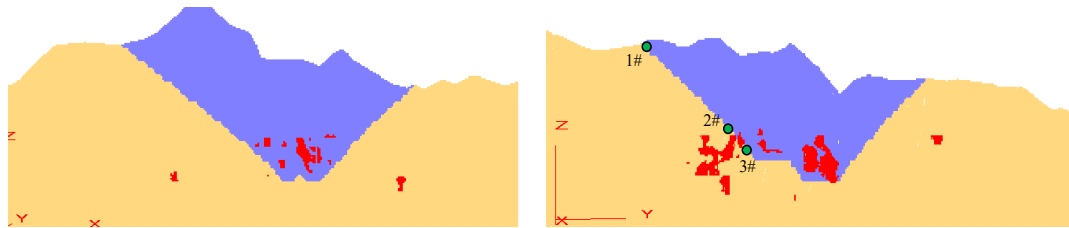
综合考虑矿体赋存条件及露天开采影响范围等因素，建立三维工程地质力学模型。力学模型上部边界为实际地表，主要包括了露天坑、地下矿体及空区（如图 2 所示），利用 MIDAS/GTS、FLAC<sup>3D</sup> 在建模、网格划分和计算方面的优势，完成模拟计算和分析。模型总体尺寸 800m×800m×370m，共生成 395000 个六面体单元，665888 个节点。模型底部边界为垂直、水平方向约束，侧面为水平方向约束，上部边界为自由边界。计算模型受力主要是岩体自重。



(a) Three dimensional model (b) Goaves distribution

图 2 露天采场三维数值模型及采空区分布

Fig.2 Three dimensional model and goaves distribution under the open-pit



(a) The profile perpendicular to the orebody trend

(b) The profile along the orebodytrend

图 3 典型剖面图及监测点布置

**Fig.3 Typical profile and monitoring points arrangement**

为更准确地分析露天采场边坡下隐伏空区失稳模式和破坏特征，采用逐个台阶依次开挖方式进行模拟，台阶高度 10m，分别模拟无空区、空区存在、空区回填三种工况。

#### 2.4 隐伏空区对露天矿山边坡稳定性影响分析

随着露天采剥作业逐渐进行，初始应力平衡被打破，引发应力重分布。有无空区工况下，沿矿体走向东北侧边坡岩体竖向应力分布规律基本相同；有空区时，西南侧岩体空区附近出现应力升高（集中）降低现象，对上部边坡变形稳定影响较大。上下盘边坡岩体，空区体积小且远离边坡，一定范围内引起岩体竖向应力改变，随空区距离增大变得不明显，影响范围与空区体积大小有关。

图 4 为各工况下边坡监测点水平位移随计算时步的历程曲线，位移由小变大，最后逐渐稳定。1#监测点位于边坡顶端，距空区较远，两种工况下监测点处水平位移趋势基本一致，且最终位移量基本相同。2#、3#监测点距空区相对较近，均不同程度受到了空区影响。2#监测点位于关键空区上方，有空

空区分布主要集中在沿矿体走向即 Y 方向（见图 1），边坡监测点布置如图 3（b）剖面图所示。

区工况下边坡水平位移值相对较大。说明受边坡附近空区作用影响，边坡移动变形较为活跃，露天开采过程应给予重视。

采用强度折减法，对各空区工况下露天矿山边坡稳定性进行分析，计算结果如图 5。无空区工况下，西南侧边坡出现剪应变增量集中区，基本贯通边坡，边坡安全系数 1.82。有空区工况下，塑性区出现在关键空区上方，变形矢量明显较大，边坡安全系数 0.41，即空区开挖后顶板及其附近边坡失稳破坏。在已有空区和露天开采双重作用下，空区上方岩体已破坏，空区存在对附近边坡影响很大。需要注意的是边坡局部破坏也容易引起边坡整体失稳。采用废石低强度胶结充填采空区，围岩应力集中程度降低。经计算，潜在滑动面出现在回填区附近，安全系数 1.51，边坡稳定性明显改善。



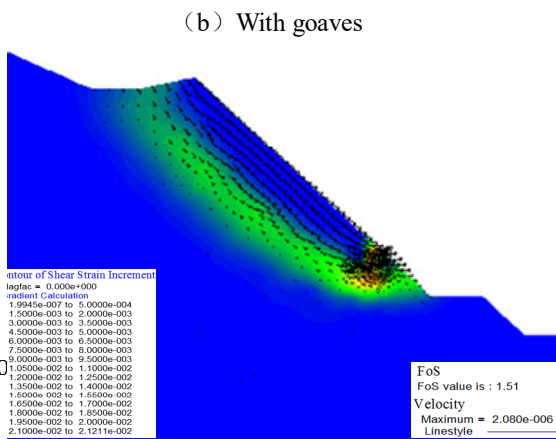
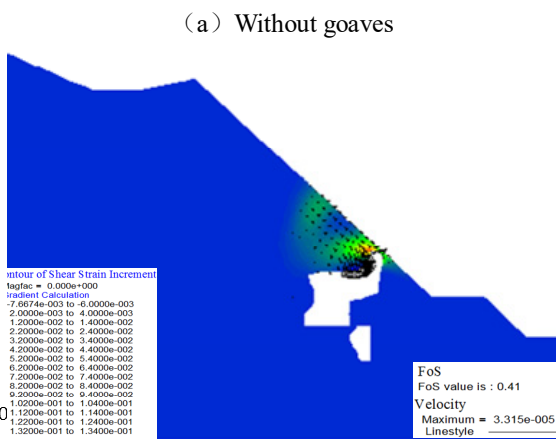
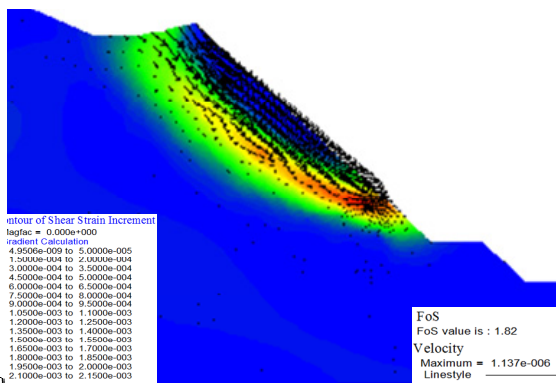
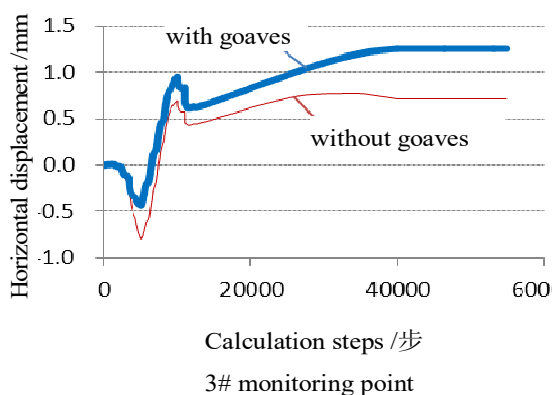
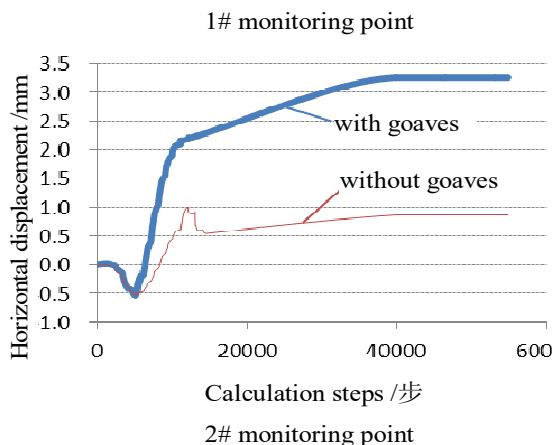
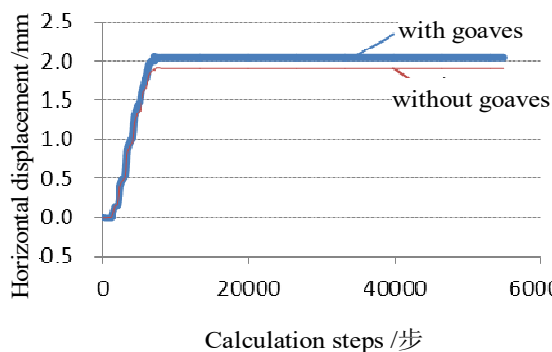


图 4 各工况下边坡监测点水平位移历程曲线 图 5 各工况下边坡剪应变云图及矢量图

Fig.4Curves of horizontal displacement of monitoring pionts Fig.5Contour of shear strain and vectorgraph

### 3 采空区顶板安全厚度的确定

隐伏空区处理时机必须准确把握，不能影响露天开采作业进度，同时必须保证露天开采作业过程人员和设备的安全。确定空区预处理合理的顶板安全厚度，采用如下方法综合分析：

#### 3.1 工程类比法

目前国内外确定顶板安全厚度的方法大多采用工程类比法，积累了大量的工程实例。根据金厂峪矿段露天采场工程地质条件及空区条件，选取了国内外有针对性的矿山进行了统计比较，具体如表 2 所示。通过工程类

比，推荐金厂峪矿段露天采场空区顶板安全厚度在 10~25m。

表 2 国内外矿山境界顶柱安全厚度统计表

Table 2 Statistics of crown pillar safety thickness in some mines at home and abroad

| Mine                  | Goaf span<br>/m | Exposed area of<br>goaf/m <sup>2</sup> | Crown pillar safe<br>thickness/m |
|-----------------------|-----------------|----------------------------------------|----------------------------------|
| Kidd Creek mine       |                 |                                        | 10~12                            |
| Frood Stobi mine      |                 |                                        | 12~14                            |
| Iron Mine of Krivorog | 15~25           | 200~600                                | 20~30                            |
| Heidargonski          | 25~30           | 100~500                                | 15~20                            |
| Zairenovski           | 25~30           | 200~2100                               | 14~16                            |
| Hikitovski            | 20~25           |                                        | 15~30                            |
| Shirengou Iron Mine   | 20              |                                        | 20                               |
| Datang mining area    | 20              |                                        | 15                               |
| Chuanyandong mine     | 20~25           |                                        | 24                               |

3.2 经验公式法

国内外对于空区顶板安全厚度（或境界顶柱）的研究较多，具有代表性的理论公式有比例跨度法、K.B.鲁佩涅依特等人公式、B.И.波哥留波夫公式、结构力学板梁理论等。Carter T.G.等<sup>[27-28]</sup>在总结 300 多个境界顶柱的基础上，提出了基于空区顶板形状尺寸、矿体倾角等几何参数确定空区顶板安全厚度的比例跨度法，该方法能够给出不同顶板厚度的安全系数、服务期限及失稳概率，并且经过了大量的工程实践验证。K.B.鲁别涅依特等人主要分析空区跨度及顶柱岩体特性（强度及构造破坏特性）对顶柱安全厚度的影响，同时也考虑了上部载荷如电铲、松散体等作用力，建立了合理的顶板安全厚度计算公式。B. И.波哥留波夫增加分析了空区顶板抗压抗拉特性和爆破动载荷的影响，发展和完善了 K.B.鲁别涅依特等人公式。结构力学板梁理论，假设采空区顶板是两端固定的

平板梁，顶板承受的荷载及岩体自重是上覆岩体荷载，结合梁板受弯的情况考虑，将岩体所能承受的抗弯抗拉强度作为破坏的标准。而松散系数理论认为，只要顶柱厚度大于塌陷松散岩石填满空区所需高度就是安全的。

在分析空区赋存状态、顶板受力情况同时，考虑围岩体物理力学性质、爆破动载影响等因素，根据这些理论和经验公式的适用条件，在安全系数取 1.5 条件下，确定合理的空区顶板安全厚度，具体计算结果详见表 3。

3.3 极限平衡法

采空区上覆岩层包括上覆顶板、崩落松散体以及受水压作用，采用划分微分条块的办法计算重力和侧边剪力，微分条块数量越多，计算结果越精确。在考虑每一微分条块不同物理力学指标的同时，应用极限平衡法估算空区顶板安全厚度，顶板受力平衡关系见图6。采空区上覆n条岩层(对于i条厚度 $h_i$ )

侧边剪力与重力和水压力比值（即安全系数）  $f$  为

$$f = \frac{\text{抗滑力}(R)}{\text{滑动力}(W)} = 2 \sum_{i=1}^n (c_i h_i / \sin \theta + \sigma_{xi} h_i \tan \varphi_i) / (\sum B \gamma_i h_i \sin \theta + \gamma_w h_w B) \quad (3)$$

$$\sigma_{xi} = \frac{\mu_i}{1 - \mu_i} \left( \sigma_{z(i-1)} + \frac{\gamma_i h_i}{2} \right) = \frac{\mu_i}{1 - \mu_i} \left( \sum_{j=1}^{i-1} \gamma_j h_j + \frac{\gamma_i h_i}{2} \right) \quad (4)$$

式中：  $n$ ，即岩土层数；  $\gamma_i$ 、  $c_i$ 、  $\varphi_i$ 、泊松比；  $\sigma_{xi}$  为水平应力；  $\sigma_{z(i-1)}$  为上层垂直  
  $\mu_i$  分别为岩层的容重、粘聚力、内摩擦角、应力。

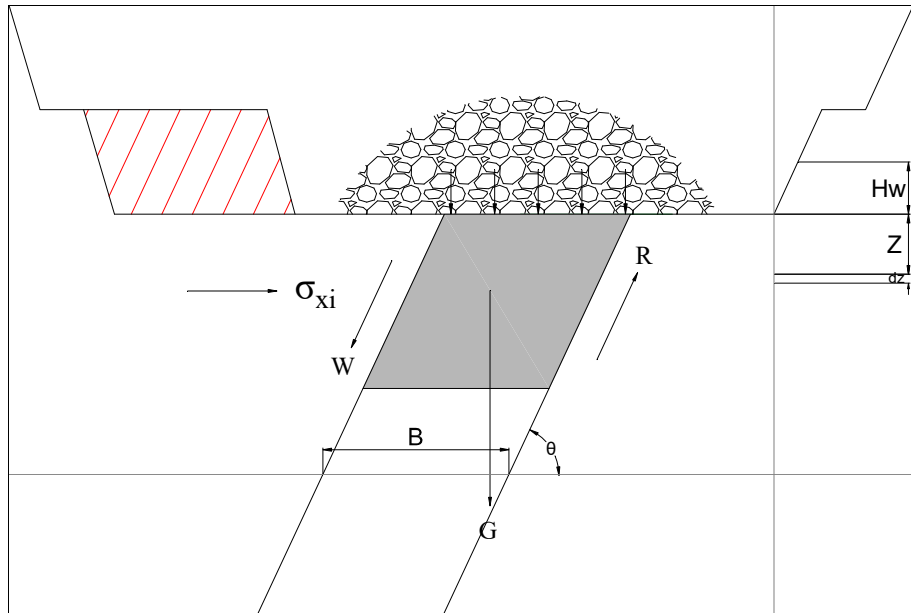


图 6 上覆顶柱受力示意图

Fig.6 Force diagram of crown pillar

当空区跨度为12m时，对类比法及其他理论公式确定的顶板安全厚度，采用极限平衡法校核其安全系数，此处不考虑水压作用，其结果见表3。随着空区跨度增加，空区顶板安全厚度呈非线性增加（见图7）。除比例跨度法和B.И.波哥留波夫计算结果稍大外，其他方法计算结果较为接近，主要原因是比例跨度法中岩体综合质量指标Q，因工程地质数

据缺乏，根据经验取值稍偏低所致；B.И.波哥留波夫考虑了顶板抗压抗拉特性及爆破载荷等较多因素影响。

对比分析可知，采用类比法及其他理论计算方法，顶板安全厚度存在一定差异，极限平衡法校核时其安全系数也不同。这是因为各种计算理论都有其自身的一些基本假设，计算公式也有其特定的适用条件，影响因素



不相同,边界条件有差异等。综合上述分析,板安全厚度取 10.5m 合适,满足类比法及主  
按照重大岩石工程稳定性的设计要求,安全要工程力学理论的安全要求。  
系数要求在 1.5 以上,空区跨度为 12m 时顶

表 3 各方案顶板安全厚度的校核安全系数

Table 3 Collated Safety factor of the safety thickness of crown pillar for each solution

| Sequence number | Numerical method                 | Crown pillar safe thickness /m | Collated Safety factor | Remark                               |
|-----------------|----------------------------------|--------------------------------|------------------------|--------------------------------------|
| 1               | Engineering analogy method       | 15.0                           | 2.36                   | The goaf height is considered as 32m |
|                 |                                  | 25.0                           | 3.05                   |                                      |
| 2               | Scaled span method               | 10.5                           | 1.97                   |                                      |
| 3               | K.B. Rupenetttheory              | 6.2                            | 1.47                   |                                      |
| 4               | B.И. Bogoryupov formula          | 10.2                           | 1.94                   |                                      |
| 5               | Structural mechanics beam theory | 7.4                            | 1.62                   |                                      |
| 6               | Loose coefficient theory         | 8.7                            | 1.78                   |                                      |
| 7               | Limit equilibrium method         | 6.5                            | 1.51                   |                                      |

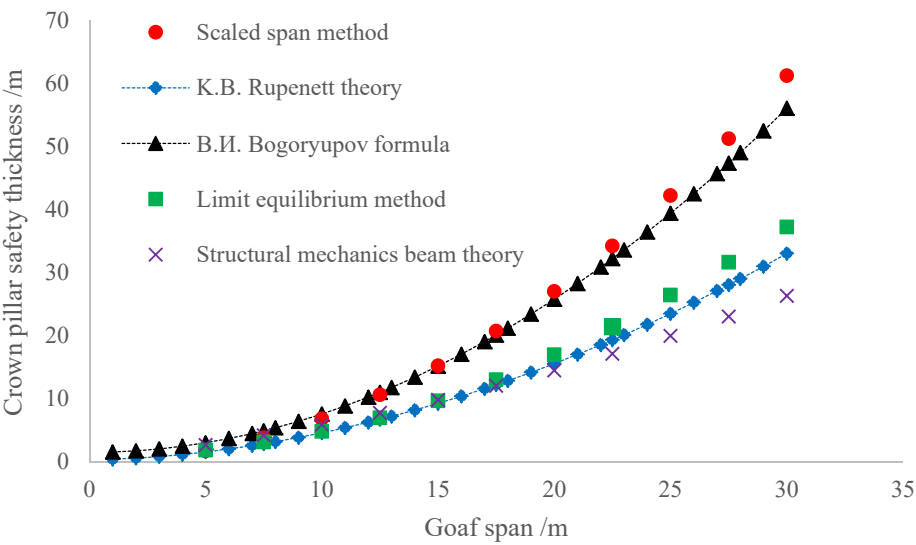


图 7 空区跨度和顶柱安全厚度关系曲线图

Fig.7 Curves of goaf span and safety thickness of crown pillar

4 露天矿山隐伏空区系统治理方案

采空区治理的实质是转移岩体应力集中部位,缓和应力集中程度,使应力达到新的相对平衡,以控制和管理地压。露天矿山隐

伏采空区的形态、分布及地质环境不同,对露天开采作业安全、最终边坡的稳定性影响机制及程度是不同的,应在钻孔超前探测及三维激光扫描测量等基础上,对采空区进行分类,系统制定不同的隐伏空区治理方案和措施。

4.1 露天开采境界内采空区

在空区形态探测清楚情况下，结合采空区围岩岩性、力学参数、矿体倾角、空区跨度及露天矿开采技术条件，主要采用类比法、力学理论计算、数值模拟等综合确定合理的空区顶板安全厚度。经分析，金厂峪矿段露

天采场隐伏空区跨度一般小于 20m，采用空区顶板安全厚度综合判别法，隐伏采空区顶板安全厚度确定为 4~27m（见表 4），可使用插值法相对准确计算空区顶板安全厚度，并结合露天台阶高度多层次处理。

表 4 空区跨度与顶板安全厚度的关系

| Table 4 Relationship between goaf span and crown pillar safety thickness |     |        |          |         |
|--------------------------------------------------------------------------|-----|--------|----------|---------|
| Goaf span /m                                                             | L≤5 | 5<L≤10 | 10<L≤15  | 15<L≤20 |
| Crown pillar safety thickness /m                                         |     | 3-7.5  | 7.5-15.5 | 15.5-27 |

当露天作业平台距离空区顶板接近安全厚度时，必须对采空区隐患进行处理。在露天作业台阶设置空区隐患警示标识，下向穿凿中深孔炮孔，爆破崩落采空区顶板以填充空区；同时中深孔穿凿也能起到探测采空区的目的。当采空区跨度不足 5m，可不对采空区崩落处理，但是应避免在采空区上方直接作业。

处理空区，以免对露天矿最终边坡整体稳定造成不利影响。结合地下开采技术方案，综合考虑采空区安全隐患经济合理的治理方案。如地下开采使用分段崩落开采方案，推荐采用矿石密实回填采空区；地下开采使用空场法开采时，则采用废石或尾砂胶结充填空区较适宜。

4.2 最终边坡下隐伏采空区

采空区距离边坡越近，对边坡整体稳定性影响越大，采空区位置及跨度是影响边坡稳定性的重要因素。露天矿最终边坡剪切滑移带附近及以内采空区，应采用废石或尾砂胶结充填方式处置采空区隐患，提高穿过空区的边坡剪切滑移带的抗剪能力，以及改善空区围岩应力集中程度。

金厂峪矿段露天采场 2013 年 12 月开始生产剥离，2019 年 9 月底已剥离至 213m 台阶。累计剥离废石量 1012.52 万 m<sup>3</sup>，2814.80 万 t；累计采出矿石量 88.05 万 m<sup>3</sup>，244.77 万 t，前期剥采比相对较大，累计剥采比为 11.50。已回填崩落处理 39 个采空区，总体积达 95.42m<sup>3</sup>。整个生产期间未发生采空区塌陷而导致采矿装备损毁和人员伤亡事件，也未发生因采空区失稳出现露天矿边坡滑塌破坏现象。

4.3 底部周界下采空区

当底部平台距离空区顶板接近安全厚度时，不能采用深孔爆破崩落空区顶板的方法

5 结论

（1）分三种空区工况条件研究采空区对

露天采场最终边坡稳定性的影响。在已有空区和露天开采双重作用下,出现应力集中现象和拉剪破坏,空区顶板失稳造成边坡局部滑塌破坏。空区回填后应力集中状态得到改善,边坡稳定性提高,说明充填体对顶板变形控制作用较明显。

(2) 结合采空区空间形态、围岩岩性、力学参数及露天采场开采技术条件,采用类比法、力学理论计算以及极限平衡法校核等,确定了隐伏空区预处理的顶板安全厚度,形成了一种空区顶板安全厚度的综合判别法。当空区跨度为 12m 时顶板安全厚度取 10.5m 合适,满足类比法及主要工程计算理论的安全要求。

(3) 露天矿山隐伏空区的形态、分布及地质环境不同,对露天开采作业安全、最终边坡的稳定性影响机制及程度不同。在空区分类基础上,制定了系统的露天采场隐伏空区治理方案和措施,具有较好的普遍性和适用性,有效指导了露天开采作业,杜绝了安全生产事故的发生。

(4) 空区顶板安全厚度分析中没有考虑地下水以及地震力等因素的影响;缺乏矿山工程地质调查数据,根据比例跨度法确定的空区顶板安全厚度数值稍大;没有考虑优势结构面对地下空区、最终边坡破坏模式的影响,这些都是下一步研究工作需要突破的地方。

## REFERENCES

- [1] 闫长斌, 徐国元. 综合物探方法及其在复杂群采空区探测中的应用[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2005, 20(3): 10-14.  
YAN Chang-bin, XU Guo-yuan. Research of composite geophysical methods and its application in detection complicated group mined-out areas[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2005, 20(3): 10-14.
- [2] 刘长会, 刘树才, 闫赛, 刘焱, 苏林. 综合物探技术在浅埋煤层采空区勘查中的应用[J]. 工程地球物理学报, 2011, 8(1): 51-54.  
LIU Chang-hui, LIU Shu-cai, YAN Sai, LIU Yi, SU Lin. Application of Integrated Geophysical Exploration Techniques to Detecting Shallow Coal Gob[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2011, 8(1): 51-54.
- [3] 杨汉臣. 综合物探技术在采空区探测中的应用及研究[J]. 山西建筑, 2010, 36(23): 113-114.  
YANG Han-chen. The comprehensive geophysical prospecting technology application and research in mined up region detection [J]. Shanxi Architecture, 2010, 36(23): 113-114.
- [4] 王洪武, 贺昌友, 王进. 古采空区地球物理勘测实践与研究[J]. 采矿技术, 2008, 8(5): 13-16.  
WANG Hong-wu, HE Chang-you, WANG Jin. Practice and research on geophysical survey in ancient goaf [J]. Mining Technology, 2008, 8(5): 13-16.
- [5] 薛涛. 基于突变理论的露天矿复杂采空区稳定性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.  
XUE Tao. Research on goaf stability of open pit mines based on catastrophe theory[D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [6] HU Yu-xi, LI Xi-bing. Bayes discriminant analysis method to identify risky of complicated goaf in mines and its application [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(2): 425-431.
- [7] 陈佳耀, 史秀志, 周健, 邱贤阳. 基于正交设计的露天转地下空区变形预测及可靠度分析[J]. 中国有色金属学报, 2016, 26(11): 2383-2392.  
CHEN Jia-yao, SHI Xiu-zhi, ZHOU Jian, QIU Xian-yang. Deformation prediction and reliability analysis of underground mining shifted from open-pit based on orthogonal experiment [J]. The Chinese

- Journal of Nonferrous Metals, 2016, 26 (11): 2383-2392.
- [8] 柴红保, 曹平, 柴国武, 林杭. 采空区对边坡稳定性的影响[J]. 中南大学学报(自然科学报), 2010, 41(4): 1528—1534.
- CHAI Hong-bao, CAO Ping, CHAI Guo-wu, LIN Hang. Influence of goaf on slope stability[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2010, 41(4): 1528—1534.
- [9] 丁新启, 张华, 李远. 采空区影响下的高边坡稳定性综合分析[J]. 有色金属(矿山部分), 2009, 61(3): 39-43.
- DING Xin-qi, ZHANG Hua, LI Yuan. Analysis on the stability of high slope effected by mined-out area[J]. Nonferrous Metals(Mine Section), 2009, 61(3): 39-43.
- [10] 万文. 地下空区对边坡稳定性的影响研究[D]. 长沙: 中南大学, 2006.
- WAN Wen. Study on the stability of slope influenced by the underground vacant area[D]. Changsha: Central South University, 2006.
- [11] 李元辉, 南世卿, 赵兴东, 杨天鸿, 唐春安, 张永斌, 谭志宏. 露天转地下境界矿柱稳定性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(2): 278—283.
- LI Yuan-hui, NAN Shi-qing, ZHAO Xing-dong, YNAG Tian-hong, TANG Chun-an, ZHANG Yong-bin, TAN Zhi-hong. Stability of boundary pillars for transition from open pit to underground mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(2): 278—283.
- [12] 赵兴东. 谦比希矿深部开采隔离矿柱稳定性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(增1): 2616—2622.
- ZHAO Xing-dong. Stability analysis of insulating pillar of excavation of CHAMBISHI Copper Mine in depth[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(增1): 2616—2622.
- [13] TAO Zhi-gang, LI Meng-nan, ZHU Chun, HE Man-chao, ZHENG Xiao-hui, YU Shi-bo. Analysis of the Critical Safety Thickness for Pretreatment of Mined-Out Areas Underlying the Final Slopes of Open-Pit Mines and the Effects of Treatment[J]. Shock and Vibration, vol.2018, Article ID 1306535, 8pages, 2018.
- [14] 彭欣. 复杂采空区稳定性及近区开采安全性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011.
- PENG Xin. Study on stability of complex cavity and safety in near-cavity excavation[D]. Changsha: Central South University, 2011.
- [15] 林杭, 曹平, 李江腾, 江学良, 何忠明. 采空区临界安全顶板预测的厚度折减法[J]. 煤炭学报, 2009, 34(1): 57—61.
- LIN Hang, CAO Ping, LI Jiang-teng, JIANG Xue-liang, HE Zhong-ming. The thickness reduction method in forecasting the critical safety roof thickness of gob area[J]. Journal of China Coal Society, 2009, (1): 57—61.
- [16] 胡建军, 黄玉柱, 吴鹏, 解联库, 万串串. 复杂空区群影响下矿山边坡稳定性数值模拟[J]. 金属矿山, 2013, (11): 25—28.
- HU Jian-jun, HUANG Yu-zhu, WU Peng, XIE Lian-ku, WAN Chuan-chuan. Study on the influence of complex mined-out area group on stability of mine slope with numerical simulation[J]. Metal Mine, 2013, (11): 25—28.
- [17] 吴姗, 宋卫东, 杜建华, 张兴才, 周家祥. 高陡边坡下充填法开采挂邦矿稳定性数值模拟与安全监测[J]. 采矿与安全学报, 2013, 30(6): 876—879.
- WU Shan, SONG Wei-dong, DU Jian-hua, ZHANG Xing-cai, ZHOU Jia-xiang. Stability of numerical simulation and security monitoring of filling method to mining the hanging wall ore on high-steep slope[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(6): 876—879.
- [18] 苏毅苹, 宋卫东, 张朝雷. 高陡边坡下大型采空区充填及残矿回收技术研究[J]. 金属矿山, 2011, (5): 53—56.
- SU Yi-ping, SONG Wei-dong, ZHANG Chao-lei. Research on the filling of large mined out area and the recovery of residual ores in high and steep slope[J]. Metal Mine, 2011, (5): 53—56.
- [19] LIU Xi-ling, LUO Ke-bing, LI Xi-bing, LI Qi-yue, WANG Wei-hua, GONG Feng-qiang. Cap rock blast caving of cavity under open pit bench [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2017, 27(3): 648-655.
- [20] 程建勇, 王春毅, 林卫星. 露天台阶深孔切割崩落处理多层复合空区的工程实践[J]. 采矿技术, 2008,

- 8(3): 63—65.
- CHENG Jian-yong, WANG Su-yi, LIN Wei-xing. Engineering practice of treatment to multi-layer mined out area by caving of deep hole from open pit bench[J]. Mining Technology, 2008, 8(3): 63—65.
- [21] 邓骐宁, 唐绍辉, 潘懿, 白俊. 露天开采不同形态采空区处理技术研究[J]. 矿业研究与开发, 2016, 36(2): 28—31.
- DENG Qi-ning, TANG Shao-hui, PAN Yi, BAI Jun. Technical research on treatment of goaf with different shapes in open-pit mining[J]. MING R&D, 2016, 36(2): 28—31.
- [22] 宋卫东, 付建新, 谭玉叶. 金属矿采空区灾害防治技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2015.
- SONG Wei-dong, FU Jian-xin, TAN Yu-ye. The Control Techniques of Gob Disasters in Metal Mines[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2015
- [23] 罗周全, 鹿浩, 袁节平, 杨彪, 张保. 金属矿采空区精密探测与三维建模技术[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2008, 23(3): 83-86.
- LUO Zhou-quan, LU Hao, YUAN Jie-ping, YANG Biao, ZHANG Bao. Metal Mine's Mined-area Precise Survey and 3D Modeling Technology[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2008, 23(3): 83-86.
- [24] 罗周全, 鹿浩, 刘晓明, 李畅, 张保. 基于CMS实测的采空区群稳定性数值模拟方法[J]. IM &P 化工矿物与加工, 2008, (1): 18-21.
- LUO Zhou-quan, LU Hao, LIU Xiao-ming, LI Chang, ZHANG Bao. Numerical simulation method for mined-out area group stability based on Cavity Monitoring System[J]. IM &P, 2008, (1): 18-21.
- [25] 章林, 孙国全, 李同鹏, 刘海林, 汪亮, 陆玉根. 地下矿山采空区探测及综合治理研究与应用[J]. 金属矿山, 2013, (11): 1-4.
- ZHANG Lin, SUN Guo-quan, LI Tong-peng, LIU Hai-lin, WANG Liang, LU Yu-gen. Research of Detection and Comprehensive Treatment of Underground Mine Goaf and its Application[J]. Metal Mine, 2013, (11): 1-4.
- [26] 刘科伟. 露天开采隐患空区激光三维探测、可视化研究及其稳定性分析[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- LIU Ke-wei. Study of 3D laser scanning visualization and analysis of the stability of hazardous cavity under open-pit mine[D]. Changsha: Central South University, 2012.
- [27] Carter T.G. An update on the scaled span concept for dimensioning surface crown pillars for new or abandoned mine workings[C]//Proc. 4th North American Rock Mechanics Conf., Seattle. 2000: 465-472.
- [28] D. Jean Hutchinson, C. Phillips, G. Cascante. Risk considerations for crown pillar stability assessment for mine closure planning[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2002, (20): 41—63.

---

# Analysis on the disaster impact of concealed goaves underneath open-pit slope and its treatment

XIE Lian-ku<sup>1, 2</sup>, XIONG Dai-yu<sup>1, 2</sup>, YANG Tianhong<sup>1</sup>, WAN Chuan-chuan<sup>2</sup>, HU Jian-jun<sup>2</sup>

( 1. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning 110004, China;

2. BGRIMM Technology Group, Beijing 102628, China)

**Abstract:** Goaf is one of major hazards affecting mine's safety. In allusion to concealed goaves underneath Jinchangyu gold mine pit, the instability characteristics of pit slope under different working conditions with goaf are analyzed, the results show that stress concentration and tension-shear failure will occur when goaf exists, roof instability could cause pit slope local collapse, but the slope stability could be obviously improved after backfilling goaves. Secondly, analogy method, mechanical theories and limit equilibrium method were used to determine the crown pillar safety thickness for pre-treatment, and a comprehensive discriminant method was formed. When goaf span is 12m, the crown pillar safety thickness could be 10.5m, which satisfies safety requirements of analogy method and main engineering mechanical theories. Based on goaf classification, the goaf treatment scheme is proposed systematically, which enriches and develops key technologies for hazards treatment of goaf underneath open-pit, effectively guided open-pit mining and reduces security incidents.

**Key words:** concealed goaf; failure characteristics; crown pillar safety thickness; limit equilibrium method; comprehensive discriminant method; goaf treatment

---

Foundation item: Project (2017YFC1503101) supported by the National Key Research and Development Program of China; Projects (U1903216) supported by the National Natural Science Foundation of China-Joint fund of Xinjiang

Received date: 2019-12-27; Accepted date: 2020-04-14

Author: XIE Lian-ku; Tel: +86-18612185095; E-mail: xiejunkai@126.com

Corresponding author: WAN Chuan-chuan; Tel: +86-13811792534; E-mail: wanchuanchuan.19@126.com