

# 采空区影响下的高边坡稳定性综合分析

丁新启, 张华, 李远

(北京科技大学土木与环境工程学院, 北京 100083)

**摘要:**首钢水厂铁矿设计露天采场范围内存在一定数量地采时留下的空区, 将影响矿山的生产安全, 需进行详细的调查研究。根据空区的具体特点使用探地雷达查明了空区的位置和特征, 考虑空区对边坡的影响, 建立单空区的边坡安全系数计算公式及基于 MATLAB 编制改进的遗传算法计算程序, 分析单空区对边坡的影响规律, 并与相应的数值模拟计算结果进行对比, 验证了改进遗传算法的可靠性, 给出了采空区对采场高边坡稳定性影响, 为后期开采施工提供了重要的参考。

**关键词:**边坡; 稳定性; 探地雷达; 遗传算法; 数值模拟

**中图分类号:**TD854.6    **文献标识码:**A    **文章编号:**1671-4172(2009)03-0039-05

## Analysis on the Stability of High Slope Effected by Mined-out Area

DING Xinqi, ZHANG Hua, LI Yuan

(School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**Abstract:** There are some mined-out areas in the range of the Shuichang iron open-pit which may influence production safety, and it is necessary to make the detailed investigation and research on them. With the method of Ground Penetrating Radar, mined-out areas under the slope are investigated. Considering the influence of gob on slope stability, a formula of safety factor of the slope with sole gob is established. The slope stability is carried out by the modified genetic algorithm program which is created with Matlab and the influence of sole gob on the slope is analyzed. Results of genetic algorithm are compared with those of numerical simulation, and they are consistent.

**Key words:** slope; stability; GPR; genetic algorithm; numerical simulation

## 0 引言

首钢矿业公司水厂铁矿是我国最大的冶金露天矿, 历史上最大产能为 1 600 万 t/a, 目前生产能力 1 200 万 t/a。矿区位于河北省迁安市境内, 地理坐标为东经 118°32' ~ 118°36', 北纬 40°06' ~ 40°09'。在设计的露天采场的东、南、北边坡存在一定数量早期民采和地采时留下的采空区; 同时, 在地质勘探期间, 仅对部分围岩和矿体进行过物理力学参数试验, 没有作过专门的工程地质工作, 缺乏必要的工程地质基础资料, 使得边坡设计缺乏科学依据, 难以对边坡稳定性做出科学合理的评价。因此, 对边坡工程地质进行详细调查, 测定矿岩基本物理力学参数, 查明岩体结构特征, 查清采空区的具体位置, 进而分析边坡稳定性, 确定科学合理的边坡角, 满足生产过程中的边坡工程设计要求, 提出生产过程中边坡治理方案, 对确保露天采场安全开采具有十分重要的现实意义<sup>[1-2]</sup>。

本文根据空区的具体特点将探地雷达应用于边坡空区的探测, 查明空区的位置和特征。结合边坡岩体的工程地质特征确定岩体力学性能参数, 在详细查明边坡岩体下面空区的分布情况后, 利用极限平衡方法和遗传算法对单空区露天矿边坡的稳定性进行分析。采用极限平衡方法中的简化 Bishop 法进行具体的安全系数计算, 并对遗传算法中的简单遗传算法进行改进, 建立单空区的边坡安全系数计算公式, 分析单空区对边坡的影响规律, 并结合数值模拟对比分析得

出了科学合理的高边坡稳定性分析结果。

## 1 采空区雷达探测

黄海高程 72 m 中段以上的空区由于日久天长大量采空区已发生不同程度的崩塌, 难以进入现场进行实地调查, 加上建矿以前的民采留下了许多未处理的采空区或老窿, 其位置不详, 形态复杂, 需查明其位置和特征。因探地雷达具有体积小、重量轻、操作方便、分辨率高、经济、快速高效、无破坏性等优点, 故特别适合此类空区的探测<sup>[3]</sup>。

### 1.1 探地雷达探测空区的基本原理

探地雷达(Ground Penetrating Radar, 简称 GPR)是利用高频电磁波以宽频带短脉冲形式, 由地面通过天线 T 送入地下, 经地下地层或目的体反射后返回地面, 为另一天线 R 所接受, 脉冲波旅行时可表示为:

$$t = \sqrt{(4z^2 + x^2)} / v \quad (1)$$

式中:  $t$  为电磁波双程走时;  $z$  为反射体的深度;  $v$  为地下介质中的波速;  $x$  为发射与接受天线的距离。

当地下介质中的波速  $v$  为已知时, 可以根据测到的精确时间  $t$  值, 由上式求出反射体的深度  $z$ 。电磁波在介质中传播时, 其电磁波强度与波形将随所通过介质的电性质及几何形态而变化。因此, 根据接收到波的旅行时间(亦称双程走时)、幅度与波形资料, 可推断介质的结构。雷达图形常以脉冲反射波的波形形式记录, 波形的正负峰分别以黑、白表示, 或者以灰阶或彩色表示。这样同相轴以等灰度、等色线即可形象地表征出地下反射面。基本原理如图 1 所示。

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划(2006BAB02A17)

作者简介: 丁新启(1964-), 男, 博士

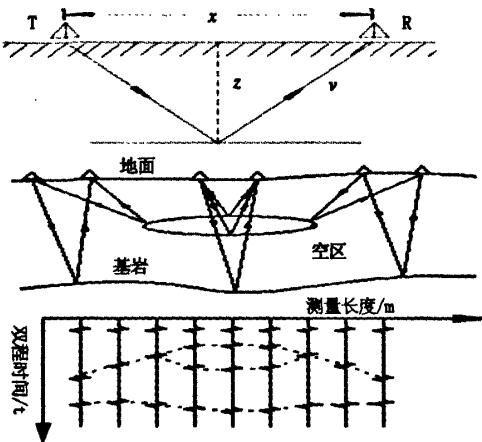


图1 探地雷达基本原理示意图

Fig. 1 The theory of GPR

## 1.2 探地雷达探测结果

通过探地雷达探测数据可知,露天境界内的空区有井巷空区、采动空区和民采留下的老窿;不同中段的井巷空区主要分布在露天境界的东侧,走向以南北向为主,空区的规模较小,且大多数的顶板都较厚;不同中段的采动空区主要呈东西向集中分布在北部边坡,其规模较大;民采留下的老窿主要零星分布在北部边坡120 m标高以下不同深度,空区体积较小,且有不同程度的塌落充填。采空区探测结果见表1。

表1 采空区探测结果汇总表

Table 1 Exploration Results

测点序号	探测点	采空区距测试地表的高度/m	备注
测点1	靠近北部运岩公路北部边坡120 m平台。	17	该测试平台下3 m左右有一不连续界面,空区里面有大量的充填物,且空区顶部较破碎,为72 m中段的采动空区
测点2	东边坡的72 m平台。		由于测试时测点积聚大量雨水,测试反射波形杂乱无章,未发现空区
测点3	靠近北部运岩公路北部边坡96 m平台。	28	96平台下4~18 m的范围内存在着破碎带,空区拱顶在96平台与108平台之间,可能是民采留下的老窿
测点4	北部运岩公路的南段	20~27	从测点开始顺路往北的路面上20~27 m范围内有三个空区,空区宽度在2~3.5 m范围内,可能是民采留下的老窿
测点5	北部运岩公路的北部		没有明显的空区,路面上20 m以下有一破碎带,宽度约8 m

## 2.1 简单遗传算法与改进遗传算法

遗传算法(Genetic Algorithms,简称GA)是基于自然选择,在计算机上模拟生物进化机制的寻优搜索算法。在自然环境中的遗传和进化过程而形成的一种自适应全局概率搜索算法,这一算法广泛应用于许多工程问题的优化<sup>[6]</sup>。

针对不同的问题,可设计不同的编码方法来表示问题的可行解,并开发出多种不同的遗传算子,构成不同的遗传算法。Goldberg总结出一种统一的最基本的遗传算法——标准遗传算法或简单遗传算法(Simple Genetic Algorithms,简称SGA)。其遗传进化操作简单、容易理解,是其它遗传算法的基础,它不仅给各种遗传算法提供了一个基本框架,同时具有重要的应用价值。

简单遗传算法中编码长度很长,搜索空间增大 耗费大

## 2 采空区露天边坡稳定性分析

圆弧滑动面法作为成熟的边坡稳定性分析方法,建立了一套完整的经验指标和工程指标,如Bishop法、瑞典条分法以及它们的改进方法等。但由于边坡地质条件的复杂性及其坡体介质的不均匀性,形状的不规范性,圆弧法假设的边坡滑移模式难以反映边坡滑移的实际状态<sup>[4-5]</sup>。而且岩土体具有时空上的变异性,边坡临界滑动面的搜索已演变成复杂的、非线性的、非凸规划问题。而传统的优化方法,因易于陷入局部最优解,难以搜索到真正的最危险滑动面。

遗传算法克服了传统方法容易陷入局部极小值的缺点,是一种全局优化算法。由于简单遗传算法对各种实际问题搜索空间的大小变化适应能力较差,计算量大,容易出现早熟现象(局部极小值),因此本文将对简单遗传算进行改进,然后利用它来搜索边坡任意形状的最危险滑动面。

通过对地质勘察结果可知,九区露天矿边坡下存在有采动空区、井巷空区和民采老窿,它们的形状复杂,规模不同,大小不一,与边坡的关系也不确定,有的单个存在,有的成群出现,因此在建立地下空区对边坡稳定性影响的模型时非常困难,只有对工程简化才能进行相关的计算。为了有代表性地分析地下空区对边坡稳定性的影响,方便计算,特别对研究对象作如下假设:

- 1) 将地下空区断面假定为规则的几何形状;
- 2) 假定地下空区走向与边坡面是平行的或者近似平行的,呈直立状;

量的时间,使得遗传算法的效率大大降低。编码长度过长是普通遗传算法的一个主要缺点。为此,针对其主要缺点,采用实数编码,采用均匀杂交法,引入高斯变异下降方向因子,对SGA加以改进,用以对边坡最危险滑动面的搜索,以达到优化之目的。具体的操作过程如下:

- 1) 编码方法采用自然数编码;
- 2) 适应度函数  $f(X)$  的确定中采用安全系数的大小反映可行解的适应性。为寻找最小安全系数,安全系数值越小,适应性能越好。
- 3) 初始解种群的确定:根据经验初步拟定出一批滑裂面。经实数编码成一条染色体。对于拟定的滑裂面形状,其对应的安全系数用式(2)进行试算。

$$F = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{n_i} |c_i b_i + (W_i + Q_i - u_i b_i) \tan \phi_i|}{\sum_{i=1}^n |[W_i + Q_i] \tan \alpha_i + Q_{Ai}|} \quad (2)$$

式中: $F$ 为安全系数; $l_i$ 为第*i*个条块滑面长度, $l_i = b_i / \cos \alpha_i$ ; $b_i$ 为第*i*个条块宽度; $c_i$ 为第*i*个条块滑动面上的粘结力; $\phi_i$ 为第*i*个条块滑动面上土的内摩擦角; $n$ 为条块数。

4)改进的选择复制:采用随机复制算法。

5)交叉算子的选择:采用均匀杂交法。

6)变异算子的选择:由实数编码的特点知,杂交点只能选在各参数之间,单靠杂交是不能给群体引进新参数值的,只有靠变异在解空间进行全局搜索,所以引入高斯变异下降方向因子加强变异的作用,此时变异成为改进遗传算法的主要成分。

7)交叉概率 $P_c$ 和变异概率 $P_m$ 是交叉和变异操作的关键参数,目前, $P_c$ 和 $P_m$ 的选取基本上还是靠经验取得,不同的情况需经反复试验确定。为克服这个缺点,采用交叉概率和变异概率,根据解的适应度值而变化。其数学表达式如下:

$$P_c = \frac{k_1(f_{max} - f_m)}{f_{max} - f_0} \quad (f_m \geq f_0, f_m \neq f_{max}) \quad (3)$$

$$P_c = k_2 \quad (f_m < f_0) \quad (4)$$

$$P_m = \frac{f_{max} - f}{f_{max} - f_0} P_m' \quad (f_m \geq f_0, f \neq f_{max}) \quad (5)$$

$$P_m = P_m' \quad (f < f_0) \quad (6)$$

式中: $f_{max}$ 为当前种群最大适应度值; $f_m$ 为待交叉父代个体适应度较大值; $f$ 为某个体适应度; $f_0$ 为种群平均适应度; $P_m'$ 为随机数; $k_1, k_2 \in (0, 1)$ ,为可调参数。

8)终止条件:本文采用最大遗传代数法,即固定一个遗传代数,迭代代数达到时计算就停止。对于子群体重复步骤4~7的操作,直至达到迭代终止条件,则计算结束,由 $f$ 最大对应的点来确定任意形状的最危险滑动面曲线。

表2 改进的遗传算法计算的边坡最小安全系数

Table 2 The slopes' smallest factor-of-safety resulting from the analyzing of adjusted SGA

空区度/m	最小安全系数									无空区
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	
2	1.378	1.507	1.511	1.352	1.454	1.511	1.511	1.414	1.511	
3	1.241	1.409	1.508	1.242	1.332	1.493	1.502	1.284	1.508	
5	0.986	1.124	1.491	0.973	1.054	1.243	1.379	0.998	1.495	1.531

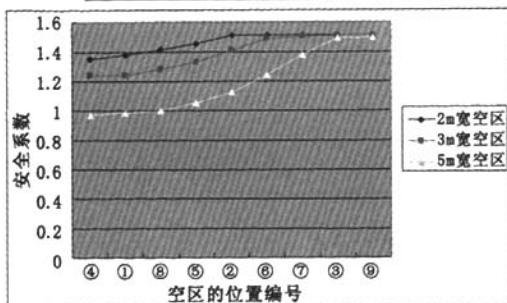


图3 边坡安全系数随空区位置变化的折线图

Fig. 3 The trend line of slopes' factor-of-safety vs. mined-out area's locations

## 2.2 利用改进的遗传算法分析采空区边坡稳定性

按2.1所述思路和运算步骤,基于MATLAB编制了简单遗传算法和改进的遗传算法的计算程序,对任意形状的边坡滑动面进行搜索,用于边坡稳定性分析和评价。

边坡分六步开挖,假定每步开挖是一次性完成的,边坡每一开挖步即每一台阶的高度为12 m,其中第一级台阶的阶段边坡角为45°,其余台阶的阶段边坡角为65°,各台阶的宽度为5.6 m,第六台阶高程为72 m,模型地面标高为150 m。为了分析空区的规模(以空区宽度为表征)、位置等因素对边坡的影响规律,结合露天矿空区的实际,在模型设置时空区的高度为30 m,宽度分别为2 m、3 m和5 m,空区按以下九种位置进行布置(参见图2):

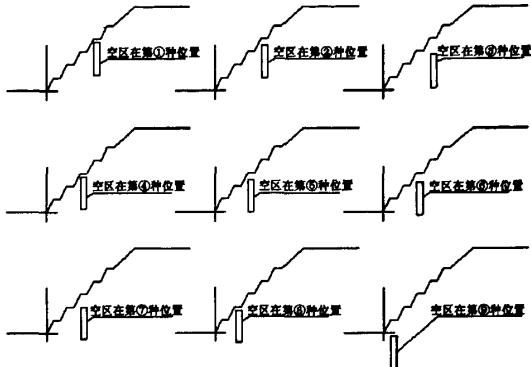


图2 空区在第①~⑨种位置时的计算模型

Fig. 2 The nine models with different locations of mined-out area

在边坡开挖到第六步时利用改进的遗传算法搜索上述模型边坡的最危险滑动面并计算其相应的安全系数,如表2和图3所示。

表2 改进的遗传算法计算的边坡最小安全系数

Table 2 The slopes' smallest factor-of-safety resulting from the analyzing of adjusted SGA

为了便于分析对比,建立的单空区露天矿边坡数值计算模型与改进的遗传算法所分析的计算模型完全对应<sup>[7~8]</sup>。模型首先开挖空区并一次性完成,然后边坡分六步开挖,假定每步开挖是一次性完成的,边坡每一开挖步即每一台阶的高度为12 m,其中第一级台阶的阶段边坡角为45°,其余台阶的阶段边坡角为65°,各台阶的宽度为5.6 m,第六台阶高程为72 m,模型地面标高150 m。空区的高度按30 m计算,宽度分别按2 m、3 m和5 m计算,空区的位置按同样的九种情况进行布置。模型的尺寸、节点数、单元数随空区位置、大小不同而异。采用摩尔~库伦准则进行计算,模型边界条件为限制位移边界条线<sup>[9]</sup>。图4~图6为2 m宽度空区在第①位置边坡开挖至第六步时的计算模型及模拟结果。

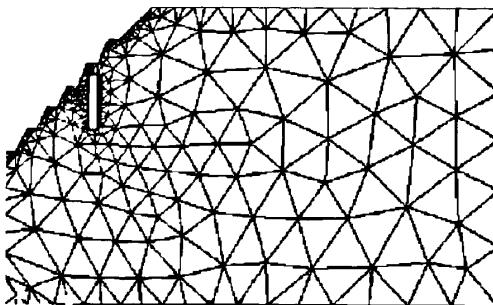


图4 2m 宽空区在第①种位置时的计算模型

Fig. 4 The numerical analysis model with 2m wide mined-out area located at the first location

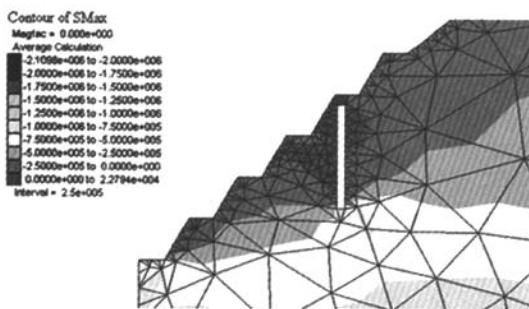


图5 空区宽2m在第①位置的最大主应力图

Fig. 5 First model's Contour of  $\sigma_1$  when the mined-out area is 2m wide

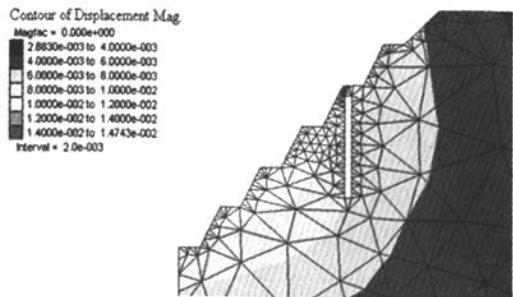


图6 空区宽2m在第①种位置的位移场图

Fig. 6 First model's Contour of displacement when the mined-out area is 2m wide

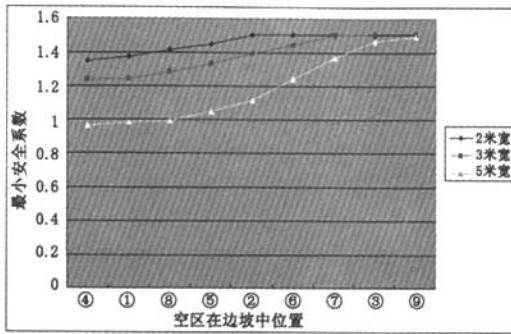


图7 边坡安全系数随空区位置变化折线图(数值计算所得)

Fig. 7 The trend line of slopes' factor-of-safety vs. mined-out area's locations (result from numerical analysis)

表3 边坡开挖到第六步时边坡的最小安全系数

Table3 The slopes' smallest factor-of-safety after the sixth excavation

空区度/m	最小安全系数									无空区
	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨	
2	1.373	1.502	1.506	1.346	1.448	1.506	1.506	1.414	1.506	
3	1.241	1.393	1.508	1.235	1.331	1.441	1.502	1.281	1.508	1.523
5	0.981	1.112	1.468	0.963	1.046	1.243	1.366	0.992	1.493	

通过全部模型的计算,得出边坡开挖到第六步时的安全系数如表3和图7所示。

由表3和图5可知,当空区宽度一定,随着空区距边坡距离的逐渐增大,边坡的安全系数也逐渐增大,到一定距离后趋于稳定,可见,随着空区距边坡越远,空区对边坡的影响越小,到一定距离后影响不明显;当空区位置一定,随着空区宽度的增大,边坡的安全系数却相应减小,如2m、3m和5m宽空区在第①种位置时,边坡的安全系数分别为1.373、1.241和0.981,即空区宽度越大对边坡的影响越大。

可见,边坡安全系数的变化与边坡应力、位移的变化具有相似的特点,与3.1节遗传算法的计算结果也吻合。

## 2.4 综合分析

通过雷达探测结果,建立相应简化计算模型,并利用改

进的遗传算法和数值模拟方法对比分析了边坡开挖过程中空区对边坡稳定性的影响,根据两种方法的计算机过可以得到以下空区对边坡稳定性影响的规律:

1) 在空区影响范围内,空区的存在对边坡稳定性影响明显。在空区影响范围内,边坡应力明显增大,且在空区附近有明显的应力集中现象;边坡位移明显大于无空区的边坡,边坡安全系数也明显降低。

2) 空区在一定距离范围内对边坡影响明显,超过一定距离空区对边坡的影响不大,且空区宽度不同,对边坡影响不同,空区宽度越大对边坡的影响范围越大。

3) 在空区影响范围内,空区距边坡坡面和平台越近,其对边坡的影响越大;随着空区距边坡坡面和平台距离的增加其对边坡的影响程度逐渐减小。

4) 在空区影响范围内,空区的宽度越大对边坡的影响越大。

5) 改进的遗传算法计算结果与 FLAC 计算结果吻合性好,对后期开采和理论分析具有重要的参考价值。

### 3 结论

1) 将探地雷达成功应用于露天矿边坡下空区的探测,查明了空区的分布位置和特征。

2) 改进了简单遗传算法,基于 MATLAB 编制了遗传算法的计算程序用于边坡稳定性分析。改进的遗传算法,对于复杂边坡,具有收敛速度快、运算效率高、准确性好的明显优势。

3) 揭示了空区对边坡影响的基本规律。建立了空区边坡模型,分别利用改进的遗传算法和有限差分法进行计算,两种方法计算的结果很吻合。研究结果表明,在空区影响范围内,空区的存在对边坡稳定性影响明显;空区位置和宽度是其影响边坡稳定性的两个主要因素;空区在一定距离范围内对边坡的影响明显,超过此距离范围影响对边坡不大,该距离与空区宽度有关,空区宽度越大该距离越大;在空区影响范围内,空区距边坡越近,其对边坡的影响越大;随着空区距边坡距离的增加其对边坡的影响程度逐渐减小;在空区影响范围内,空区的宽度越大对边坡的影响程度越大。

边坡稳定性分析仍然是岩土工程和采矿工程的一个重要发展方向,其分析计算中仍然有许多不确定因素,新的数

学计算算法的引入为其计算分析开拓了新的思路,提高了其适用性和准确度,在边坡稳定性分析计算中有广阔的前景。本文所进行的稳定性分析中对水(降雨量和地下水)、地震力、动态外载等多因素作用下的边坡稳定性没有进行分析,这是下一步工作的重点。

### 参 考 文 献

- [1] 孙玉科,杨志法,丁恩宝,等.中国露天矿边坡稳定性研究[M].北京:中国科学技术出版社,1999.
- [2] 孙广忠.岩体结构力学[M].北京:科学出版社,1988.
- [3] 孔令讲.浅地层探地雷达信号处理算法的研究[D].成都:电子科技大学,2003.
- [4] 孙君实.条分法的数值分析[[J].岩土工程学报,1984,6(2):1~12.
- [5] 孙世国,蔡美峰,王思敬.地下与露天复合采动效应及边坡变形机理[J].岩石力学与工程学报,1999,18(5):563~566.
- [6] 蔡美峰,乔兰,李长洪,等.深凹露天矿高陡边坡稳定性分析与设计优化[J].北京科技大学学报,2004,24(5):465~470.
- [7] 乔兰,李远.露天矿山高陡边坡变形破坏的工程地质模型[J].北京科技大学学报,2004,24(5):461~464.
- [8] 李长洪,蔡美峰,李军财.大型露天矿山边坡岩体结构与破坏模式分析[J].中国矿业,2004,13(2):48~51.
- [9] 李廷春,李术才,郑样波,等.三维快速拉格朗日法在安全顶板厚度研究中的应用[J].岩土力学,2004,25(6):935~939.

□

### (上接第 38 页)

(5) 特高品位问题:本次资源量估算中未出现特高品位。

6) 矿体圈定与外推原则

(1) 矿体圈定

对厚度大于或等于 0.8 m 的矿脉,用 0.08% 边界品位确定矿体边界,用 0.12% 最低工业品位确定工业矿脉。对厚度小于 0.8 m 的矿脉,用 0.05% 边界品位百分比确定矿体边界。

(2) 矿体外推

矿体边缘探矿工程不向外推,见矿工程与非见矿工程有限向外平推 1/4 工程间距。

7) 资源量估算结果

预测资源量估算结果:333 类 WO<sub>3</sub> 资源量 12 665.67 t,矿石量 135.31 万 t。其中,WO<sub>3</sub> 资源量大于 1 kt 的矿体有 4 个,共计 WO<sub>3</sub> 资源量 10 313.44 t,占总资源量的 74.67%。126 号矿体矿石量 41.54 万 t,金属量 5 001.50 t,占总资源量的 35.73%,平均水平厚度 0.56 m,平均品位 1.204%。资源

量估算见表 4。

### 4 结语

本文就画眉坳雷公地矿区为例,结合其成矿地质背景和矿床地质特征,在分析总结成矿规律的基础上,对其探矿前景进行了有益的探索,加深了对成矿规律的认识。只有从矿山实际出发,既注重现有资源的保护与利用,又加大周边与深部的探矿力度,才能缓解矿山的资源危机,延长矿山的服务年限,确保资源矿山的可持续发展<sup>[3]</sup>。

### 参 考 文 献

- [1] 干正如,方金龙.扩大钨矿远景的探矿方法研究[J].有色金属(矿山部分),2008(11):30~32.
- [2] 刘武刚,陈友智.马坑铁矿中矿段地质特征及成因认识[J].有色金属(矿山部分),2006(2):14~16.
- [3] 唐兰兰,张小帆,王成,等.新疆那拉提成矿带铜金矿找矿前景预测[J].金属矿山,2006,2:53~57.

□