

文章编号: 1000-7598-(2007) 04-0774-05

矿山露天转井下境界顶柱的数值模拟优化方法

姜谔男^{1, 2}, 陈 勇^{2, 3}

(1. 大连海事大学交通工程与物流学院, 大连 116026; 2. 东北大学资源与土木工程学院, 沈阳 110004; 3. 核工业第四研究设计院, 石家庄 050021)

摘 要: 露天底境界顶柱优化是露天转井下过渡时期的重要课题, 该优化问题包括多个决策变量和多个评价指标, 已有方法的优化效果不够理想。针对露天转井下境界顶柱优化特点, 将遗传算法与三维数值模拟相结合, 研究了境界顶柱全局优化的进化数值模拟方法, 给出优化的指标和步骤, 并将该方法用于大杏山铁矿的露天转井下境界顶柱的优化。工程应用表明所提出的井下境界顶柱优化方法是可行的。获得的最优方案对该矿山露天转井下的采矿设计具有指导作用。

关 键 词: 露天转井下; 境界顶柱; 进化数值模拟; 多目标优化

中图分类号: TB 115 文献标识码: A

Evolution numerical simulation method for optimizing boundary roof pillar in transition from open-pit mining to underground mining

JIANG An-nan^{1,2}, CHEN Yong^{2,3}

(1. College of Traffic and Logistics, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China; 2. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 3. The Fourth Institute of Nuclear Engineering, Shijiazhuang 050021, China)

Abstract: Optimizing the boundary roof pillar in the transition from open-pit mining to underground mining is an important subject; this task including many decision variables and appraise indexes, so the methods given before can't get the good result. This paper combining the genetic and 3D numerical simulation, the evolution numerical simulation method to globally optimize the boundary roof pillar is researched. The optimizing indexes and processes are given; the method has been used to optimize the boundary roof pillar in the transition from open-pit mining to underground mining of Daxingshan Iron Ore. And it is shown that the method is feasible. The scheme resulted by the method can guide the mining design for Daxingshan Iron Ore.

Key words: transition from open-pit mining to underground mining; boundary pillar; evolution numerical simulation; multiple objective optimization

1 前 言

许多露天矿山开采后期, 都面临着向井下开采过渡的问题。露天转地下采矿方法多采用空场法, 并且留设顶柱, 即境界矿柱, 这就形成了一个露天开采、境界矿柱和挂帮矿开采、主矿体井下开采的统一采空区, 同一岩体区段上受到数个应力场的作用, 使应力与变形状态很不均匀。所以对露天底境界顶柱进行优化是这个过渡期很重要的课题, 涉及到矿山生产平稳过渡和安全生产等多个方面^[1]。针对类似的境界顶柱优化问题, 以往大多依靠经验公式, 或通过工程类比, 或者采用数值模拟方法进行

多方案比较择优^[2-4]。由于露天底境界顶柱优化问题包括多个决策变量和评价指标, 已有方法的优化效果不够理想。寻求露天底境界顶柱的全局优化方法, 是迫切需要解决的问题, 对矿山安全生产和提高经济效益具有重要意义。

关于开挖顺序对地下洞室稳定性影响的研究, 国内始于 80 年代中期, 起初只是定性地指明施工顺序对围岩稳定的影响, 采用列举法择优^[5]。90 年代, 朱维申应用动态规划原理对洞室群最佳施工方案进行了研究^[6], 将多方案比较提高到多阶段决策问题。遗传算法作为一种新兴的模拟自然界生物进化机制的搜索寻优技术, 其优越性表现在它在搜索过程中

不容易陷入局部最优, 即使在所定义的适应函数上是不连续的、非规则的或有噪声的情况下, 它也能以很大的概率找到整体最优解。由于上述优点, 遗传算法为地下洞室开挖顺序及方案的全局优化方法的建立提供了很好的途径。周科平等在进行回采顺序数值模拟的基础上, 用遗传算法对矿山开采顺序进行了优化^[7]; 安红刚等基于进化有限元方法研究了水电站地下厂房的软岩置换优化方法^[8]。姜谔男等基于三维数值模拟, 将神经网络、遗传算法集成研究了地下洞室群锚固参数的优化方法^[9]。

本文针对露天转井下境界顶柱优化特点, 将遗传算法与三维数值模拟相结合, 研究了境界顶柱全局优化的进化数值模拟方法, 给出优化的指标和步骤, 并将该方法用于大杏山铁矿的露天转井下境界顶柱的优化。

2 铁矿露天转井下境界顶柱优化问题

矿山在露天转地下开采过渡时期, 为保证产量波动不大, 一般在垂直方向上露天与地下同时开采, 用空场法进行地采。此时, 为了处理好露天与地下同时开采相互影响的问题, 需要在露天坑的底部与地下开采第一中段的矿房顶部之间保留一定厚度的境界顶柱。境界顶柱厚度设留过小将会影响地下开采的安全, 预留过大则会造成资源的浪费。所以境界顶柱厚度合理的确定对于露天转井下过渡期的安全生产和经济效益具有重要的意义。

目前国内外确定采空区处理所需的境界矿柱厚度的确定方法有以下几种。(1) K.B.鲁别涅依等人的公式;(2) B.И.波哥留波夫公式;(3) 平板梁理论推导;(4) 松散系数理论;(5) 经验类比法;(6) 数值模拟方法。由于矿山地质体及采场结构的复杂性, 使绝大多数的岩土工程问题很难给出其解析解。综观上述的方法, (1) - (5) 将问题进行了过大的简化, 导致结果的偏差较大。而数值模拟方法采用离散化原则, 即把大范围的复杂问题分解或离散化为较小的等价单体或组分进行分析, 使得具有复杂工程特性的岩土体问题有了量化的评价手段。然而, 境界顶柱厚度的合理确定涉及很多的因素, 采场间柱布置、境界顶柱厚度和开采顺序多个决策变量相互影响, 组合产生大量备选方案, 使优化具有相当的难度。采用数值模拟进行简单的方案对比, 往往会遗漏更有价值的方案, 影响优化的效果。为此, 本文将遗传算法与三维数值模拟相结合, 建立了具有全局优化能力的露天转地下开采的境界顶柱优化的进化数值模拟方法。

3 境界顶柱优化的进化数值模拟方法

3.1 境界顶柱优化的数学描述与评价指标

理论上, 露天转井下的境界顶柱优化问题可以简单描述为如下有约束的最优化问题:

$$\left. \begin{aligned} \min f(x) \\ s.t. s_i(x) \geq 0, \quad i=1, 2, \dots, m \\ h_j(x) = 0; \quad j=1, 2, \dots, l(l \leq n) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: x 为与境界顶柱相关的变量; $f(x)$ 为目标函数; $h_j(x)=0$ 为约束条件, 是表示满足的岩石力学数值模拟计算原理; $s_i(x) \geq 0$ 表示满足的判别性安全准则, 一般采用极限应变 ε_0 和最大收敛位移 $\delta_{\max}$ 。境界顶柱优化问题的目标是安全性与经济性达到最佳, 采用多目标优化方法, 多个目标函数描述如下:

反映稳定性的属性指标: $Ob_1(x), Ob_2(x), \dots, Ob_m(x)$ 。反映经济性的属性指标: $Ob_{m+1}(x), Ob_{m+2}(x), \dots, Ob_n(x)$ 。通过式 (2) 可以计算各方案评价指标的归一化值:

$$\mu_i(x_s) = (Ob_i - Ob_{\min}) / (Ob_{\max} - Ob_{\min}) \quad (2)$$

式中: $Ob_{\max}$ 为最不稳定参照方案的评价指标, 采用劣岩石力学参数和不利方案; $Ob_{\min}$ 为最稳定参照方案的评价指标, 采用优岩石力学参数和有利方案; Ob_i 为第 i 个方案的实际评价指标。

采用安全率小于 1 的岩体体积、最大竖向位移、最大侧向位移、塑性区体积和矿石损失量 5 个指标作为境界顶柱优化问题的多个评价指标。其中的安全率是指由 Mohr-Coulomb 强度准则所决定的极限应力状态与实际应力状态的比值, 矿石损失量是指与最小厚度顶柱无间柱空场法方案的相对矿石损失量。

由以下公式, 将某方案各个目标函数值的归一化值进行综合, 得到该方案综合评判值:

$$Z(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \mu_i(x) \quad (3)$$

式中: λ_i 为归一化的方案权系数, 由德而菲法确定; $Z(x)$ 即为式 (1) 中 $f(x)$ 的多目标表达形式。

3.2 境界顶柱优化的进化数值模拟步骤

通过遗传算法与有限元算法的集成, 建立进化数值模拟方法。遗传算法是通过适应值来评价方案优劣的, 因此在露天转井下的境界顶柱优化问题中, 需要通过三维数值模拟 (本文采用有限元方法) 对每个候选方案的的安全率、最大竖向位移、最大侧向位移、塑性区体积指标进行计算, 以得到适应值。所谓进化数值模拟方法就是将数值计算程序嵌入

到遗传算法中,将综合评价指标目标函数作为适应值,优化中每计算一次适应值需调用数值模拟算法进行一次计算,达到全局优化的目的。其具体步骤是:

(1) 设置待搜索参数个数 Np , 最大进化代数 $Ngen$, 群体规模 $Psize$, 每个待搜索参数的二进制表示位数 $Nbit$ 、突变变异率 Jr , 两点逆转变异率 Cr , 随机数种子 $Irand$ 和待搜索参数的搜索区间范围。

(2) 建立 3D 数值计算模型,其单元划分要将间柱布置、顶柱厚度及开采间距所组合的所有可能方案包括在内。

(3) 置进化代数计数器 $igen=0$, 由遗传算法随机产生一组初始可行方案作为父代群体,该组方案包含 $Psize$ 个个体。

(4) 对每种方案进行建立 3D 数值计算,确定每种方案下洞室开挖引起的评价指标大小,作为适应值。

(5) 遗传操作。对父代群体中每个个体进行二进制编码,将每个个体用一条染色体来表示,其中重要的因素放于编码链的前端。从父代群体中随机选择两个个体 $P1$ 和 $P2$,采用竞争选择方法。对 $P1$ 和 $P2$ 进行一致杂交和变异操作,最后生成一个新个体 H 。对新个体 H 进行解码,得到对应的参数方案。

(6) 重复步骤(5),直到产生 $Psize$ 个新个体,即生成子代群体。

(7) 最佳个体保留机制。将父代中的最佳个体(适应值最小的个体)随机置换子代中的一个个体。将子代群体转换为父代群体,即为新的父代群体。

(8) 置 $igen=igen+1$,判断 $igen$ 是否等于 $Ngen$,若等于,则进化搜索结束,最后一代中的最好个体所代表的方案即为所求得的最佳方案;若不等,则转到步骤(4),继续搜索。算法流程图见图 1。

4 大杏山铁矿工程应用

4.1 工程介绍

杏山铁矿床行政区划隶属于河北省迁安市木厂口镇白龙港村所辖。矿区位于迁安铁矿南区,矿床面积 1.8 km^2 ,属燕山支脉南麓,低山丘陵地貌,区内地势总体为西北、西南高,南东低。杏山采区现采用露天方法开采,设计规模 $7010 \times 4 \text{ t/a}$,露天采矿场设计最高开采标高 305 m ,最低 -33 m ,现在已开采到 $+15 \text{ m}$ 水平。露天矿计划在 2005 年 6 月闭坑。杏山矿床受向斜构造控制,将 F9 以东(下盘)矿体命名为“小杏山”,以西(上盘)矿体命名为“大杏山”^[10]。

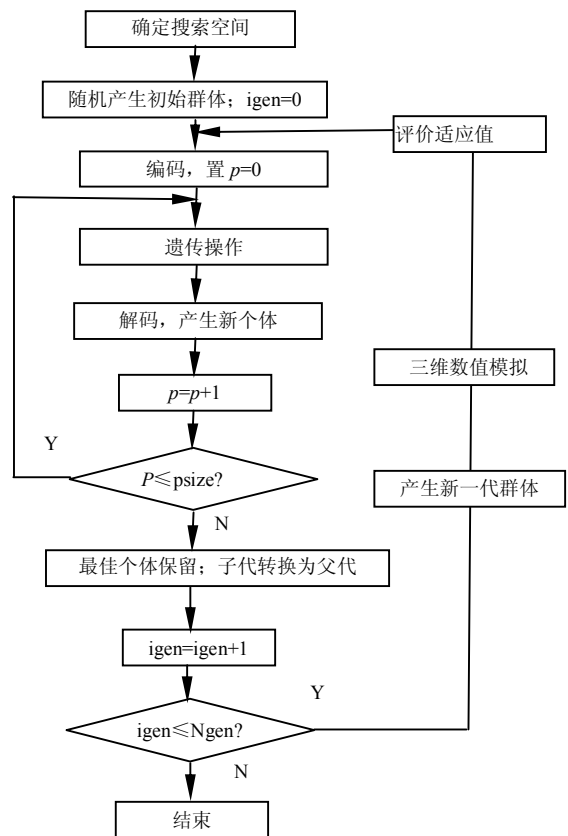


图 1 境界顶柱进化数值模拟算法流程

Fig.1 The arithmetic process of the evolution numerical simulation method for optimizing boundary roof pillar

4.2 大杏山铁矿露天转井下境界顶柱进化数值模拟优化

根据大杏山铁矿地质结构、力学特性和境界顶柱的有关决策变量,建立三维数值计算模型。大杏山矿体围岩以石榴黑云斜长片麻岩和混合花岗岩为主,矿体内夹层(石)以斜长角闪岩居多,其它与围岩一致。依据岩块力学特性测试结果,并考虑了岩体的结构效应、地下水、露天开采爆破等因素对岩体力学参数的影响,对岩块力学参数进行适当的修正,将力学参数相近的岩体归并成混合岩体,计算模型采取如下两组力学参数,见表 1。

表 1 计算模型材料的物理力学参数表

Table 1 The mechanical parameters of the calculating model materials

材料种类	容重 / $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	弹性模量 / GPa	抗拉强度 / MPa	内聚力 / MPa	内摩擦角 / $(^\circ)$	泊松比 μ
矿体	32.5	36.8	16.53	18.6	45	0.22
岩体	30.4	55.68	11.3	13.27	44.5	0.31

采用境界顶柱下矿体开采以 20 m 划分为 1 个矿房,每个矿房一次采完,不考虑时间效应,岩体采用 Mohr-Coulomb 的屈服准则。本次优化模拟不

考虑边坡矿回收工程的影响，模型境界底直接到开采设计的-33 m 水平，模型两侧以境界底为中线向两边外延 270 m，在大杏山端帮封闭，在小杏山一侧以 F9 断层为界沿矿体走向外延 200 m，模型底则向下到开拓第 2 阶段-123 m 水平，假设在大杏山境界顶柱开采时小杏山没有开采。

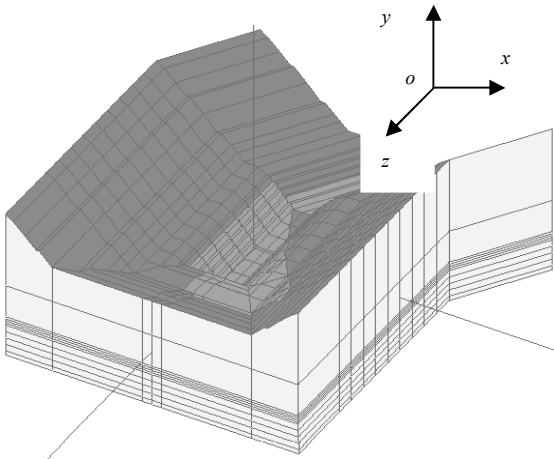


图 2 计算模型的单元网格
Fig.2 The mesh of the calculating model

以最终的露天境界底作为三维模型的 XOZ 平面，垂直 XOZ 平面向上为 Y 轴的正方向，在模型的四周加上 X, Z 轴方向的面约束，在模型的底部加上 X, Y, Z 方向面约束。计算模型见图 2。

大杏山铁矿的露天转井下开采总体的方案是留顶柱，露天、井下同时进行开采，开采进路垂直矿体走向，沿矿体走向 20 m 划分 1 个矿块（也是一步开采的矿房）。在过渡时期井下开采是否留间柱、间柱分布位置、开采顺序的不同对境界顶柱的影响是不同的。所以从间柱、顶柱厚度和采场布置方式 3 个因素考虑进行方案的组合，见表 2。

表 2 组合方案的各参数取值
Table 2 The parameter values of different schemes

取值代码	间柱布置	顶柱厚度/m	开采顺序
1	无间柱	5	从+Z轴往-Z轴方向
2	两侧间柱	6	从中央向两侧开采
3	中央间柱	7	从-Z轴往+Z轴方向
4	均布间柱	8	
⋮	⋮	⋮	
16		20	

采用进化数值模拟进行计算，遗传参数选择为 $Np=3; Ngen=20; Fsize=10; Nbit=4; Jr=0.15; Cr=0.15$ 。由德尔菲法确定安全率小于 1 的岩体体积、最大竖向位移、最大侧向位移、塑性区体积和矿石损失量

这 5 个指标权重分别为 0.31, 0.19, 0.16, 0.18, 0.16。以公式 (3) 为适应值计算公式。经过遗传操作，进化到 20 代，搜索得到最优方案为 262；即采用两侧间柱、顶柱厚度 10 m，从中间向两侧开采的方案为最优。最优方案下，小于 1 的安全率的体积为 827 m^3 ，最大竖向位移为 0.039 m，最大侧向位移 0.133 m，塑性区体积为 $1\,793 \text{ m}^3$ ，矿石损失量 $72\,613 \text{ m}^3$ 。

4.3 结果分析

通过进一步对包括最优方案在内的几个典型方案进行数值计算和比较分析发现，当矿房开采完后，采场顶板在距上、下盘距离相等的位置比较容易受拉应力作用而产生拉破坏。采场上、下盘的帮也有较大位移变形，但比顶板的安全性要好些。如果境界顶柱下不留矿柱，当采场完全空场后，采场顶板变形也很大，安全率很低，采场破坏的可能性非常大。如果不在靠近端帮一侧留矿柱，那么这部分矿房空场后，采场顶板和边帮都会受到很大的应力作用，安全率很低，破坏的可能性非常大。

最优方案，即采用两侧间柱、顶柱厚度 10 m，从中间向两侧开采的方案，采场顶板应力集中度小，安全率小于 1 的区域较少，顶板在 Y 方向的应力和位移值都不大。最优方案的顶板最大主应力等值线图、 X 向位移分色图分别见图 3，图 4。分析结果说明优化结果是合理的。

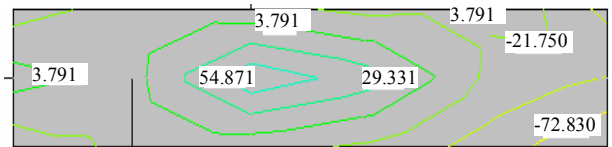


图 3 最优方案顶板最大主应力等值线图
Fig.3 The maximum principal stress contours of the optimum scheme

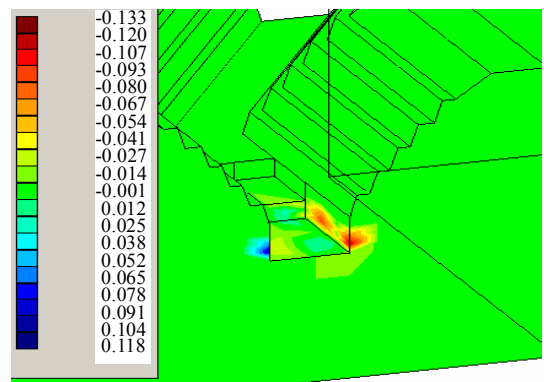


图 4 最优方案 X 向位移分色图
Fig.4 The X displacements contours of the optimum scheme

5 结 论

针对露天转井下境界顶柱优化的特点,提出了将遗传算法与三维数值模拟相结合的进化数值模拟全局优化方法,进行大杏山铁矿的露天转井下境界顶柱优化。通过本文的工作得到如下的认识:

1) 本文提出的井下境界顶柱优化的进化数值模拟方法,具有全局优化的特点,具有隐并行性,优化过程不需求导,搜索速度快,有效地利用了三维数值计算和遗传算法的优势,是一种新型的先进的优化方法。

2) 通过对大杏山铁矿露天转井下境界顶柱进化数值模拟优化,获得了最优方案即采用两侧间柱、顶柱厚度 10 m、从中间向两侧开采的方案。该方案对即将进行的该矿山露天转井下的采矿设计具有指导作用。

3) 通过工程应用,表明本文提出的井下境界顶柱优化的模型,评价指标和优化步骤是可行的。所研究的方法对于解决露天转井下类似的优化问题具有借鉴意义。

参 考 文 献

- [1] 李鼎权. 论露天转地下开采的若干特点[J]. 金属矿山, 1994, 2: 9—12.
LI Ding-quan. Characteristics of transition from open-pit mining to underground mining[J]. **Metal Mine**, 1994, 2: 9—12.
- [2] 陈茂林, 尹小鹏, 张世雄. 露天转井下开采次生应力场的有限元模拟研究[J]. 铜业工程, 2003, (3): 4—9.
CHEN Mao-lin, YIN Xiao-peng, ZHANG Shi-xiong. Finite element numerical simulation on the induced rock when transit from open cut to underground mining[J]. **Copper Engineering**, 2003, (3): 4—9.
- [3] 张永彬, 赵兴东, 马天辉, 等. 露天转地下境界顶柱稳定性分析[J]. 采矿技术, 2003, 3(2): 29—31.
- [4] 施建俊, 孟海利, 高克林. 境界顶柱稳定性的数值模拟研究, 矿冶工程, 2004, 24(6): 7—10.
SHI Jian-jun, MENG Hai-li, GAO Ke-lin. Numerical simulation of the stability of boundary pillar[J]. **Mining and Metallurgical Engineering**, 2004, 24(6): 7—10.
- [5] 余裕泰, 黄赛超. 坚硬而不完整岩体中地下洞室的分期开挖[J]. 地下工程, 1984, (11): 31—35.
- [6] 朱维申, 王平. 动态规划原理在洞室群施工力学中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 1992, 11(4): 323—331.
ZHU Wei-shen, WANG Ping. Application of dynamic programming principles in tunnel construction mechanics [J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1992, 11(4): 323—331.
- [7] 周科平, 古德生. 遗传算法优化地下矿山开采顺序的应用研究[J]. 中国矿业, 2001, 10(5): 50—54.
ZHOU Ke-ping, GU De-sheng. Optimization of stopping sequence in underground mine by using genetic algorithm [J]. **China Mining Magazine**, 2001, 10(5): 50—54.
- [8] 安红刚, 冯夏庭. 大型洞室群稳定性与优化的进化有限元方法研究, 岩土力学, 2001, 22(4): 373—377.
AN Hong-gang, FENG Xia-ting. The research of evolutionary finite element method of the stability and optimization at large cavern group[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2001, 22(4): 373—377.
- [9] 姜谟男, 冯夏庭, 刘建, 等. 基于三维数值模拟的地下大型洞室锚固参数智能优化[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 23(10): 1 700—1 705.
JIANG An-nan, FENG Xia-ting, LIU Jian, et al. Intelligent optimization of anchoring parameters for large underground houses based on three-dimensional numerical simulation[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 23(10): 1 700—1 705.
- [10] 首钢地质勘察院地质研究所. 河北省迁安铁矿区杏山铁矿床补充勘探地质报告[R]. 2003, (3): 1—43.