

基于采矿环境再造人工结构的可靠性研究

朱和玲^{1,2}, 周科平^{1,2}, 高峰^{1,2}

(1. 中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083;

2. 湖南省深部金属矿开发与灾害控制重点实验室, 湖南 长沙 410083)

摘要:基于采矿环境再造技术构筑的地下人工结构,要实现安全采矿的前提是其本身要保持足够的稳定性和可靠性.首先客观分析了地下岩体特征和充填体强度存在的不确定性,然后引入 NESSUS 可靠度分析软件与 ANSYS 有限元软件联接这一新方法进行可靠度研究,最后结合工程实际,对新疆喀拉通克铜镍矿试验采场结构的可靠性进行模拟,初始可靠度为 0.940 586 5,通过调整相关变量来优化结构可靠性,最终结构可靠度增大为 0.967 374,满足设计要求.

关键词:采矿环境再造;地下人工结构;可靠度

中图分类号:TU473.2

文献标识码:A

Study on the Underground Structure Reliability Based on the Re - Constitutional Mining Environment

ZHU He-ling^{1,2}, ZHOU Ke-ping^{1,2}, GAO Feng^{1,2}

(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China;

2. Hunan Key Lab of Mineral Resources Exploitation and Hazard Control for Deep Metal Mines, Changsha, Hunan 410083, China)

Abstract: The underground artificial structure is based on the reconstructed mining environment, and maintaining its reliability and stability is a prerequisite for realizing a safe, economical and efficient mining. First of all, the characteristics of the rockmass in deep underground and the strength of backfilling are analyzed objectively, and then the reliability analysis software NESSUS is introduced to make reliability study, connecting with the finite element software ANSYS. Finally, the reliability of stope structure of the Kelatongke Copper - Nickel Mine in Xinjiang province is simulated, getting the value of 0.940 586 5. By adjusting the correlative variables to optimize the reliability of the structure, the value of reliability increases to 0.967 374, which meets the design requirements.

收稿日期:2008-9-25

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划基金资助项目(2006BAB02A02);国家自然科学基金资助项目(50490274);国家教育部博士点基金资助项目(20050533035).

作者简介:朱和玲(1983-),男,湖南郴州人,中南大学硕士研究生.主要研究方向:采矿方法设计与数值模拟.

Key words: the reconstructed mining environment; underground artificial structure; reliability

0 前言

采矿环境再造技术^[1-3]是目前中南大学在高价值复杂矿体开采中取得的具有自主知识产权的技术成果,其本质是通过下向进路采矿技术、岩层控制技术、注浆技术等,在回采矿段周围用胶结充填料构筑一个人工封闭结构,然后在这一结构下采用强制与诱导耦合技术实现安全、经济、高效采矿。其中,人工结构的可靠性与否是实施采矿环境再造成败的关键。众所周知,地下人工结构处在地质应力、地下水和地热等多种作用之下,其稳定性还受采场结构、充填体强度、回采顺序、爆破震动等作用的影响,同时围岩及充填结构本身参数的变异性和随机性对稳定性的影响,这些条件或因素一方面说明了地下结构可靠性分析的复杂性,另一方面也体现了对其进行可靠度研究的必要性。

20 世纪 30 年代以来,结构可靠度的理论研究和应用都取得了很大的进展,获得了很多宝贵的经验^[4-7];但是随着工程应用范围的不断扩大,其局限性也日益突出,比如大型复杂结构的内力和位移一般要用有限元方法进行分析,这时结构的响应与结构上作用荷载之间的关系不能再用一个显式来表达,当对结构或结构构件进行可靠度分析时,所建立极限状态方程也不再是一个显式,从而造成了迭代求解可靠指标的困难。目前已有学者研究将通用有限元软件与可靠度分析相连接,以解决极限方程迭代求解的困难^[8-9]。

本文运用 NESSUS 软件对人工结构的可靠度进行研究,通过控制 ANSYS 软件的计算来调用其运算结果,并基于可靠度分析结果调整相关参数,实现对结构的优化设计,最终提高结构的可靠性。

1 可靠度研究的必要性

人工结构要求具有一定的可靠性,是因为工程结构在设计、施工、使用过程中具有种种影响其安全、适用、耐久的不确定性,这些不确定性大致可分为事物的随机性、事物的模糊性和事物知识的不完善性。因此,要研究处在地下岩体中的由充填体构筑的人工结构可靠度,必须分析地下岩体和充填体的不确定性^[10]。

1.1 地下岩体特征的不确定性

在长期的工程实践中,人们认识到岩体是地

质体的一部分,其中存在着大量的结构面,如节理、裂隙、断层等,因而具有非常复杂的力学特征,这与岩体的成岩过程、地质赋存环境和工程活动密切相关,因此,地下岩体工程涉及的工程地质条件及岩体性质参数是复杂多变和随机的。地下岩体特性的不确定性主要包括以下几个方面。

- 1) 岩体力学性质的不确定性
- 2) 岩体结构的不确定性
- 3) 所受载荷的不确定性
- 4) 统计带来的不确定性

1.2 充填体强度的不确定性

对于使用胶结充填采矿法的矿山,充填体的强度特征往往是影响采矿工程成败的关键因素之一,一个特定矿山使用某种胶结充填采矿法进行矿体回采时,充填体的设计强度是一个确定值,各个矿山都有各自的设计标准。事实上,在生产现场充填体的实际强度并非是一个定值,而是受充填材料的性质、充填料浆浓度、充填体的养护时间、养护条件、充填工艺等各个随机因素的影响,这些因素都具有不确定性,因而必然导致充填体强度具有不确定性。

- 1) 充填材料及其性质的不确定性
- 2) 充填工艺及其其他因素引起的不确定性
- 3) 充填体结构尺寸的不确定性

2 可靠度的概念及研究方法

2.1 可靠度的概念

所谓地下岩体工程结构可靠度,是指地下岩体工程在规定的时间内,在规定的条件下,完成预定功能的概率,又称为可靠概率,记为 P_s 。可见地下岩体工程结构可靠度是地下岩体工程结构可靠性的概率度量,亦即前者是关于后者的一种定量描述。

设基本变量 $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$ 的联合概率密度为: $f_{(x)}(x) = f_{(x)}(x_1, x_2, \dots, x_n)$, 则:

$$P_s = P(Z \geq 0) = \int_{Z \geq 0} f_x(x) d(x) = \int_{x_1 \geq 0} \dots \int (x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1 dx_2 \dots dx_n$$

地下岩体工程结构整体或部分在超过某种状态时,结构就不能满足设计规定的某一功能要求的状态,称为地下岩体工程结构的极限状态。地下

岩体工程结构的极限状态实质上是结构工作状态的一个阈值,若超过这一阈值,则岩体工程结构处于不稳定状态;若没有超过这一阈值,则处于安全状态.如果用 $X = (i = 1, 2, \dots, n)$ 表示影响地下岩体工程工作状态的基本随机变量,用 $Z = g(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 表示描述岩体工程工作状态的函数,则岩体工程的工作状态可用下式表示:

$$Z = g(X_1, X_2, \dots, X_n) \begin{cases} < 0, \text{失稳状态} \\ = 0, \text{极限状态} \\ > 0, \text{可靠状态} \end{cases}$$

极限状态时的方程 $Z = g(X_1, X_2, \dots, X_n) = 0$ 称为极限状态方程,它构成了一个 n 维极限状态面,把基本变量划分为两个区域,即失效区域和可靠区域.

2.2 可靠度的研究方法

可靠度分析就是承认所用数据的正确性、破坏机理的合理性以及分析方法本身的适用性都具有一定程度不确定性的前提下,建立可靠度评价的随机模型,把其中输入参数如介质物理力学参数、地下水压分布、地应力以及各种载荷等看成随机变量、随机过程或随机场,通过随机模型把有关假定、参数值、边界条件和初始条件的不确定性引申到结果的不确定性,借助于概率论、数理统计和随机过程理论,求得可靠度指标或失效概率,步骤如下.

- 1) 确定结构可靠度分析中涉及到的随机变量和结构失效的判别准则.
- 2) 将 NESSUS 软件与 ANSYS 软件相联接进行可靠度运算.
- 3) 对可靠度、重要度及敏感度进行分析,调整相关参数对可靠度进行改进,其关系如图 1 所示.

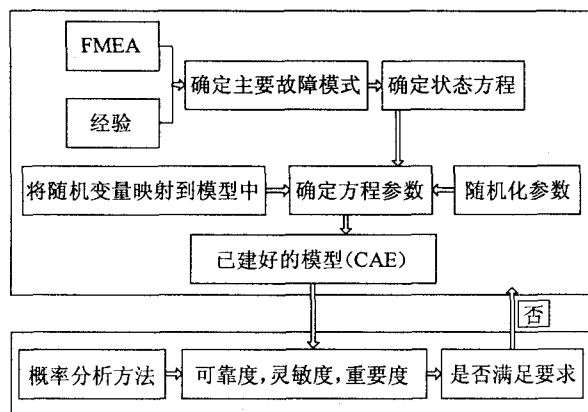


图 1 可靠性分析方法示意图

Fig. 1 The analytical method of reliability

3 工程应用实例

3.1 采矿环境再造人工结构构筑

新疆喀拉通克铜镍矿矿石品位高,矿岩软破,矿岩节理裂隙发育,整体稳定性差,实施采矿环境再造技术工业试验. 首先用传统的下向进路胶结充填采矿法分层构筑 9 m 厚的混凝土顶板,层与层之间采用锚杆联接;然后在该顶板下仍然采用下向进路胶结技术构筑两宽度为 6 m,间距为 25 m 的混凝土条柱,而在另两侧面则采用预注浆、打长锚索等措施进行加固;最后在 +598 m ~ +605 m 间构筑混凝土单堑沟集矿底部结构,最终形成一个新的采矿环境,见图 2 所示.

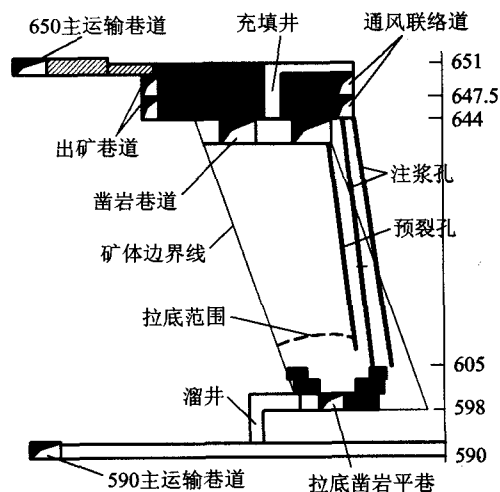


图 2 环境再造结构图

Fig. 2 The structural style of reconstructed mining environment

3.2 数值模型构建

1) 基本变量参数及其概率分布函数

根据现场测定结果统计各参数的平均值和标准差,并假设各参数是互相独立的. 在工程可靠性工程中,Weibull 分布应用非常广泛^[11-12],由于其含有三个参数而具有很强的适应性,对各种类型的试验数据也具有很强的拟合能力,诸如正态分布、指数分布、瑞利分布等,可以看作是 Weibull 分布的特例,常见工程材料的疲劳寿命和强度分布都可以用 Weibull 分布很好地描述. 因此,本文也选用 Weibull 分布来描述试验参数取值的不确定性,各参数见表 1 所示.

取重力加速度 $g_1 = 9.8 \text{ m/s}^2$.

2) 在 ANSYS 中建计算模型

在 ANSYS 软件中建立人工结构模型、施加边界条件并模拟开挖过程,提取整个过程中人工结构的最大变形值和应力值,限于文章篇幅此处省略了运算程序.其数值模型如图 3 所示:

表 1 结构力学参数
Table 1 The mechanical parameters of structure

试验参数	平均值	标准偏差
条柱高度 H_1/m	46.00	0.5
顶板厚度 H_2/m	9.00	0.1
条柱宽度 W_1/m	6.00	0.1
顶板宽度 W_2/m	37.00	2.0
充填体密度 $d_1/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2 400.00	240.0
充填体弹模 e_1/Pa	25e10	25e9
泊松比 ν_1	0.20	0.01
垂直地应力 p_1/Pa	8e6	8e5
侧应力系数 k_1	1.20	0.02

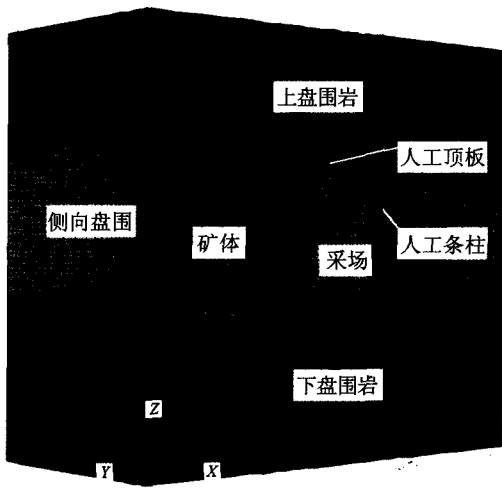


图 3 数值模型图
Fig.3 The numerical model

3)在 NESSUS 中建计算模型

系统中只要有一个单元或部件发生故障,系统就失效,这样的系统称为串联系统.在对分析地下人工结构的可靠度时,主要选择从应力和应变两方面入手,即:当结构变形值超过材料的极限应变值或者结构所承受的应力超过材料的极限应力时,人工结构即为失效.其失效状态方程: $p_f = P \{ (x_1 < 0.0 \text{ OR } x_2 < 0.0) \}$.

式中: $x_1 = ux_{max} - ux$

$x_2 = stress_{sm} - stress$

$(ux, stress) = f(h_1, h_2, w_1, w_2, e_1, d_1, p_1, \nu_1, k_1, g_1)$

ux_{max} 和 $stress_{sm}$ 分别为充填体的最大变形值和极限应力值,该值通过可以通过试验获取;而 ux 和 $stress$ 则分别为 ANSYS 软件计算中获得的最大变形值和极限应力值.

3.3 可靠性分析结果

NESSUS 软件得到的结构可靠性分析结果主要从可靠度、重要度及敏感度来体现.

1)可靠度

由状态方程可知,计算结果得到的是结构的失效概率,即结构的可靠度为 $p_s = 1 - p_f$, $p_f = 0.594135E - 01$,所以可靠度为 $p_s = 0.940\ 586\ 5$.地下工程的可靠度分析具有明显的复杂性,正如前所述其受地下岩体特征和充填体等不确定性的影响,以及采矿过程中的爆破冲击、崩矿、采空区处理等因素的影响,因此要适当提高设计的可靠度.

2)重要度

在可靠度分析中,每个单元或参数对整个系统可靠度的贡献大小是不同的,这种影响大小用重要度表示.对重要度分析的意义主要在于:确定系统薄弱环节、需要检测的关键部件、改善系统可靠度的措施以及评定系统故障诊断时的校对清单排序表等.

概率重要度 $I_g(i)$ 定义为

$$I_g(i) = \frac{\partial F_s}{\partial F_i}$$

式中: $F_s = g(F_1, F_2, \dots, F_n)$,表示整个系统的不可靠度,它是各个单元不可靠度的函数, F_i 为任意单元的不可靠度,利用上式在已知系统可靠度时候可求得各个单元的重要度.

从数值模拟的结果看,条柱宽度 W_1 的重要度最大,说明其对整个系统可靠度的影响最大,有必要对其进行优化调整.

3)敏感度

在概率分析中,单元的敏感度定义为

$$\frac{\partial R_s}{\partial R_i} \cdot \frac{R_i}{R_s} = \frac{\partial R_s}{R_s} / \frac{\partial R_i}{R_i}$$

式中: $R_s = f(R_1, R_2, \dots, R_n)$,表示整个系统的可靠度,是各个单元 R_i 可靠度的函数.敏感度表示的是单元可靠度相对变化引起的系统可靠度相对变化,从系统正常工作状态分析,要提高整个系统的可靠度,应该优先提高影响整个系统可靠度的单元的可靠度,为此要进行敏感度分析.各参数的敏感度水平值如表 2 所示.

将各参数均值和标准差的敏感度以柱状图的

形式表现出来见图4所示。

黑色代表的是均值,灰色代表的是标准差,正负表示的是对可靠度的影响方向。由图4可以得出,充填体弹性模量、水平应力系数和条柱宽度对结构可靠度的影响最大,由于水平应力系数难以改变,因此只能通过提高充填体的强度和加宽条柱来调整结构的可靠度。增大充填体弹性模量为 $e_1 = 30 \times 10^4 \text{ Pa}$ 和加宽条柱宽度 $W_1 = 6.50 \text{ m}$ 后,再对结构进行可靠度计算。此时计算结果得到结构的失效概率 $p_f = 0.326260 \times 10^{-1}$, 则可靠度为 $p_s = 1 - p_f$, 即 $p_s = 0.967374$, 几乎提高了3个百分点,满足设计要求。

表2 参数的敏感度水平值

Table 2 Sensitivity levels of random variable

random variable	$\frac{d(p)}{d(u)}$	$\frac{d(p)}{d(\sigma)}$	$\frac{d(p)}{d(u)} \frac{\sigma}{p}$	$\frac{d(p)}{d(\sigma)} \frac{\sigma}{p}$
H_1	0.1126	0.0735	0.9476	0.6187
H_2	-0.2786	0.4092	-0.4690	0.6888
W_1	-0.1418	0.1897	-1.193	1.597
W_2	-0.0044	-0.0211	-0.1477	-0.7098
d_1	0	0	-0.0153	2.480
e_1	-0.0002	0.0001	-0.7458	0.4109
v_1	0	0	1.151	0.3804
p_1	-1.901	-3.824	-0.3200	-0.6436
k_1	-0.8009	6.156	-0.2696	2.072

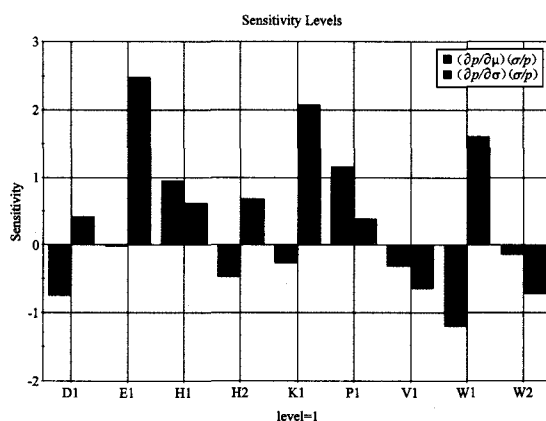


图4 参数敏感度图

Fig. 4 Sensitivity level of parameters

4 结论

1) 针对高价值复杂难采矿体的回采难题,提

出了采矿环境再造技术,通过构筑地下人工结构实现安全采矿。分析了地下岩体特征和充填体强度的不确定性,得出该地下人工结构可靠度分析的复杂性和必要性。

2) 引入 NESSUS 软件对结构可靠度进行分析,并与 ANSYS 软件联接提取相关结果来定义问题中的响应,该方法克服了极限状态方程指代不精确、迭代困难等局限性。

3) 结合工程实际,对新疆喀拉通克铜镍矿构筑的地下结构可靠性进行研究,得出可靠度为 0.9405865,通过调整相关参数来优化结构可靠性,最终结构可靠度为 0.967374,满足设计要求。

参考文献:

- [1] 古德生,李夕兵.现代金属矿床开采科学技术[M].北京:冶金工业出版社,2006.
- [2] 周科平,朱和玲,肖雄,等.采矿环境再造连续开采地压演化过程控制与仿真[J].中南大学学报(自然科学版),2008,39(3):417-422.
- [3] 周科平,朱和玲,肖雄,等.基于开采环境再造深孔诱导崩矿方案优化研究[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2008,23(3):3-9.
- [4] 赵国藩,贡金鑫,赵尚传.我国土木工程结构可靠性研究的一些进展[J].大连理工大学学报,2005,40(3):253-258.
- [5] 赵国藩,金伟良,贡金鑫.结构可靠度理论[M].北京:中国建筑工业出版社,2000.
- [6] 李军,贺国京,李飞,等.凤滩水电厂房可靠性的模糊综合评判[J].中南大学学报(自然科学版),2006,37(3):618-622.
- [7] 韩斌,张升学,邓建,等.基于可靠度理论的下向进路充填体强度确定方法[J].中国矿业大学学报,2006,35(3):372-376.
- [8] 赵廷弟,曾声奎,康锐.计算机辅助可靠性设计分析系统研究[J].航空学报,2000,21(3):206-209.
- [9] 金星,洪延姬,沈怀荣,等.工程系统可靠性数值分析方法[M].北京:国防工业出版社,2008.
- [10] 韩斌,金川二矿区充填体可靠度分析与1#矿体回采地压控制优化研究[D].长沙:中南大学,2004.
- [11] 邓建,古德生,李夕兵.确定可靠性分析 Weibull 分布参数的概率加权矩法[J].计算力学学报,2004,21(5):609-613.
- [12] 严春风,刘东燕,张建辉.岩土工程可靠度关于强度参数分布函数模型的敏感度分析[J].岩石力学与工程学报,1999,18(1):36-39.