

# FTA 在某露天矿边坡安全评价中的应用

林友, 黄德镛, 刘名龙

(昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093)

**摘要:** FTA 是安全系统工程中的重要分析方法之一. 采用 FTA 法对云南省某露天矿边坡作了定性及定量分析. 通过对边坡 4 种破坏形式的分析, 构造出边坡破坏的事故树, 计算得出 12 个最小割集和 2 个最小径集, 找出了边坡失稳的主要因素为崩落和边坡角过大. 该法在安全评价中获得了应用.

**关键词:** 事故树分析法; 边坡稳定性; 露天矿; 安全评价

**中图分类号:** TD824. 73 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007 - 855X(2005)05 - 0006 - 05

## Application of FTA in Safety Evaluation of A Certain Open Pit Slope

L N You, HUANG De-yong, LU Ming-bng

(Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

**Abstract:** Fault tree analysis (FTA) is one of important analysis methods in safety system engineering. The method is used for qualitative and quantitative analysis on the slope of a certain open pit in Yunnan province. According to the analysis of four slope destruction forms, slope destruction FTA is constructed, and twelve minimal cut sets and two minimal pathway sets are attained. At the same time, it is found out caving and oversize slope angle are the primary factors that result in slope collapse. The method is used in safety evaluation.

**Key words:** fault tree analysis; slope stability; open pit; safety evaluation

## 0 引言

某露天矿位于云南省个旧市的新山坡顶上, 属山坡露天矿, 北低南高, 岩溶峰峦连绵. 海拔高程在 1 960 ~ 2 540 m 之间. 边坡最大高度为 70 m, 边坡角为 45°, 该矿采用人工挖掘、汽车运输的开采方式. 该矿安全评价的重点内容是边坡的稳定程度, 即边坡失稳是否会给作业人员带来伤害. 为达此目的, 在评价工作中, 除现场实地调查以外, 还引用了事故树进行分析.

## 1 露天矿边坡地质概况

矿区内地层为中生界三迭系中统碳酸盐类岩层, 层位主要位于个旧组卡房段  $T_2 g_1^2$ ,  $T_2 g_1^3$  两个岩层. 下部为燕山晚期的黑云母花岗岩分布, 呈岩珠侵入上述的碳酸岩类岩层中. 矿体产于白沙坡花岗岩珠南东部的缓坡上部和接触带上. 该矿体总体产状与花岗岩珠形态大致相同, 随花岗岩接触带的起伏而变化. 矿体产状为北 30° ~ 50° 东, 倾向南东, 倾角 5° ~ 10°. 是北北东条状产出. 矿石类型为灰绿色、灰色砂卡岩硫化矿.

该露天矿的边坡主要由亚粘土、灰色中厚层状灰岩与白云岩灰岩互层、深灰色含碳质泥质薄层状灰岩和砂卡岩型硫化矿组成, 属散体结构类型的边坡. 矿区位于分水岭的斜坡地带, 属深切割中山地形, 处于当地侵蚀基准面以上, 地表岩溶发育, 无地表水系分布. 矿体埋藏于地表 10 ~ 50 m 的浅表层. 在储量计算范围内, 水文地质条件较为简单, 地下水对矿床无充水影响; 地下水主要由大气降雨补给, 可自然排泄, 不会对边坡造成重大影响.

收稿日期: 2004 - 11 - 30

第一作者简介: 林友 (1981. 7), 男, 在读硕士研究生. 主要研究方向: 矿业系统工程. E-mail: linyou507@sohu.com

### 2 边坡破坏分析

露天采场由于受到地形地貌、自然环境、矿岩构造等因素的制约,在实施采剥生产过程中,边坡岩体的稳定程度取决于岩体本身的应力平衡状态,当下滑力大于抗滑力时,就容易出现滑落<sup>[1]</sup>. 大面积岩体滑落不仅会伤人,而且对露天采场的破坏也是很严重的.

影响露天矿边坡的稳定因素是复杂的,其中岩体的岩石组成、岩体构造和地下水是最主要的因素,此外,爆破和地震、边坡形状等也有一定的影响.

通过实地考察辨识,获悉该露天矿边坡为一斜坡. 边坡地下水和生产爆破的影响甚小. 另外,经过初步分析后,边坡角有些偏大. 工作平台较为平整,但在边坡坡顶面上后缘的多数地段均有裂缝出现,裂缝宽度约为 1~4 cm,距边坡前缘 2~6 m,可以看出边坡发生局部破坏的可能性较大. 根据新山矿区的地质情况,由于露天采场的边坡属散体结构类型的边坡,故边坡破坏的形式为圆弧滑动破坏的可能性最大<sup>[1]</sup>. 因此,该矿在边坡的管理过程中,还存在着一些可能诱发伤亡事故的潜在不安全因素,这些因素都是矿山的危险源,少数危险源具有较大的能量,一旦引发事故,往往会给生产管理造成不可弥补的损失.

### 3 露天矿边坡破坏 FTA 分析

事故树分析法 (FTA) 又称故障树分析,是一种逻辑演绎系统安全分析方法. 它是从要分析的特定事故或故障开始,层层分析其发生原因,一直分析到不能再分解为止;将特定的事故和各层原因(危险因素)之间用逻辑门符号连接起来,得到形象、简洁地表达其逻辑关系(因果关系)的逻辑树图形,即事故树. 通过对事故树简化、计算达到分析、评价的目的<sup>[2]</sup>. 例如<sup>[3]</sup>,近几年来,矿山斜井跑车事故经常发生,应用事故树分析跑车事故的发生原因,并根据基本事件结构重要度的分析结果,采取有效防范措施是防止事故发生的有效途径.

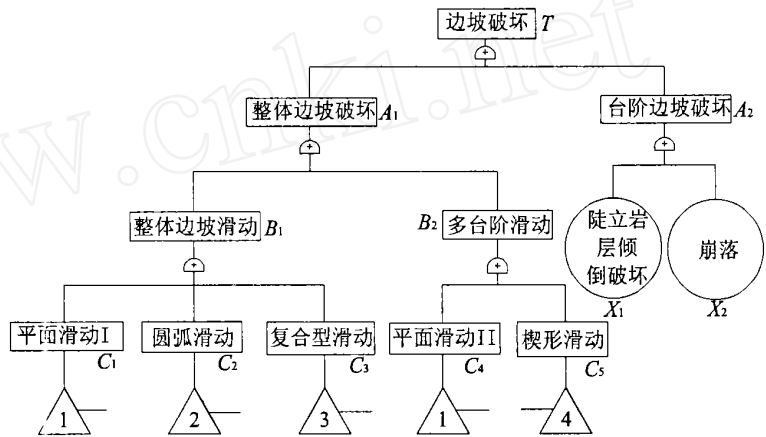


图1 露天矿边坡破坏事故树图  
Fig.1 Open pit slope destruction map of FTA

#### 3.1 边坡破坏事故树的构造

由于边坡破坏会造成群伤事件,有可能造成整个露天采场的破坏,因此,是矿山的重大危险源,根据边坡的地质概况,通过对导致边坡破坏事故原因的调查和分析,找出了影响事故发生的 10 个基本事件. 根据其发生的逻辑关系,构造出如图 1 所示的事故树图,类似地,平面滑动、圆弧滑动、复合型滑动、楔形滑动事故树详见图 2~5. 用此法便可以分析出边坡破坏的主要形式及原因<sup>[2]</sup>.

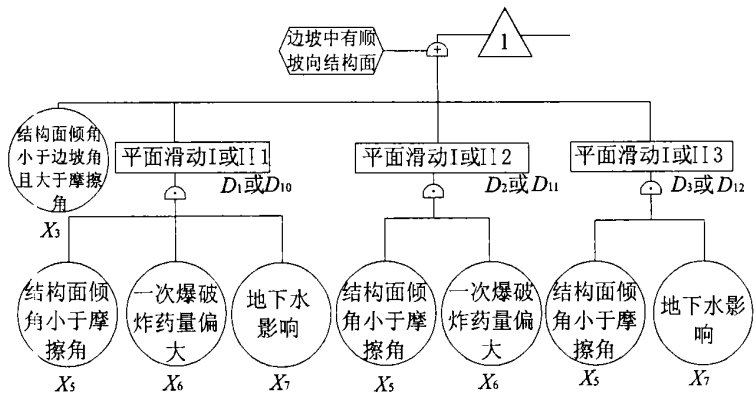


图2 平面滑动 I 或 II  
Fig.2 Plane slippage I or II

### 3.2 求解最小割集

最小割集是表示系统的危险性,每个最小割集都是顶上事件发生的一种可能渠道.最小割集的数目越多越危险<sup>[4]</sup>.现用布尔代数法求最小割集,由图 1 并联系图 2~5 可得出该事故树的结构函数:

$$T = X_3 + X_5 X_6 X_7 + X_5 X_6 + X_5 X_7 + X_6 X_7 X_8 + X_6 X_8 + X_7 X_8 + X_6 X_7 X_9 + X_6 X_9 + X_7 X_9 + X_4 + X_6 X_7 X_{10} + X_6 X_{10} + X_7 X_{10} + X_1 + X_2$$

将上式经逻辑化简后求得最小割集共有 12 个,即为:

$$K_1 = \{X_1\}, K_2 = \{X_2\}, K_3 = \{X_3\}, K_4 = \{X_4\}, K_5 = \{X_5, X_6\}, K_6 = \{X_5, X_7\}, K_7 = \{X_6, X_8\}, K_8 = \{X_7, X_8\}, K_9 = \{X_6, X_9\}, K_{10} = \{X_7, X_9\}, K_{11} = \{X_6, X_{10}\}, K_{12} = \{X_7, X_{10}\}$$

### 3.3 求解最小径集

将事故树图 1 中的“或”门用“与”门代替,“与”门用“或”门代替,并将全部事件符号加上“”,变成事件补的形式,这样便可得到与原事故树对偶的成功树,求成功树的最小割集便是原事故树的最小径集(每个最小径集为预防顶上事件发生的一条途径)<sup>[2]</sup>.即

$$T = X_1 X_2 X_3 X_4 (X_5 + X_6 + X_7) (X_5 + X_6) (X_5 + X_7) (X_6 + X_7 + X_8) (X_6 + X_8) (X_7 + X_8) (X_6 + X_7 + X_9) (X_6 + X_9) (X_7 + X_9) (X_6 + X_7 + X_{10}) (X_6 + X_{10}) (X_7 + X_{10})$$

由上式展开经逻辑化简求得该成功树共有 2 个最小割集,即原事故树共有 2 个最小径集:

$$P_1 = \{X_1, X_2, X_3, X_4, X_6, X_7\}, P_2 = \{X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_8, X_9, X_{10}\}$$

### 3.4 顶上事件发生概率的计算

当事故树中含有重复出现的基本事件或基本事件可能在几个最小割集中重复出现时,最小割集之间是正交的,这时,可按最小径集法计算顶上事件发生的概率,其计算公式为<sup>[4]</sup>

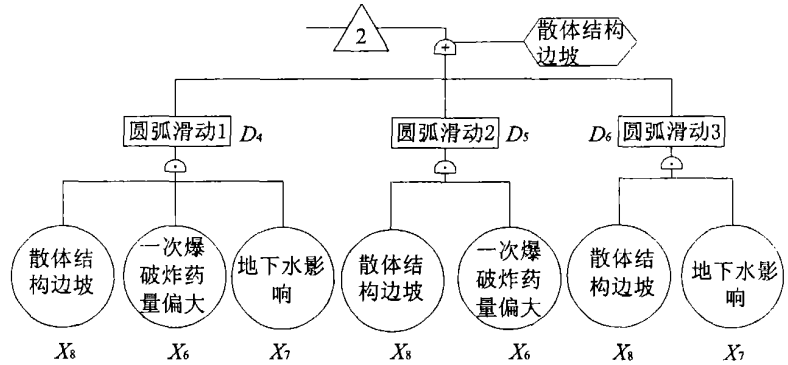


图3 圆弧滑动  
Fig.3 Arc slippage

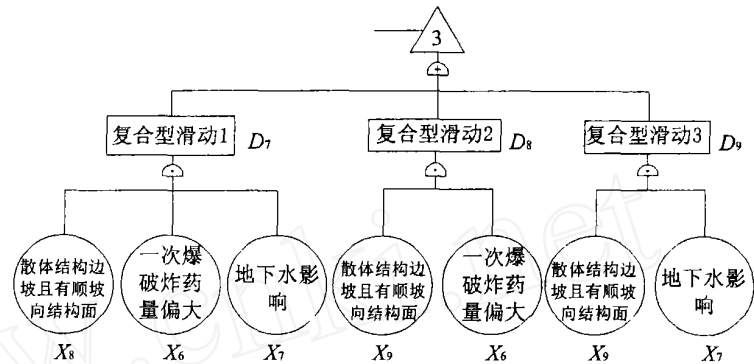


图4 复合型滑动  
Fig.4 Compound type slippage

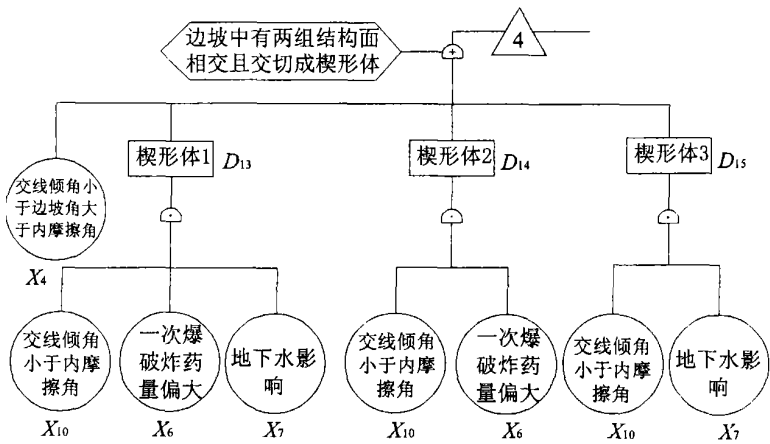


图5 楔形滑动  
Fig.5 Cuniform slippage

$$P(T) = 1 - \prod_{r=1}^k (1 - q_i) + \sum_{1 \leq r < s \leq k} \prod_{X_i \in P_r} (1 - q_i) - \dots - (-1)^{k-1} \prod_{X_i \in P_r} (1 - q_i) \quad (1)$$

式中:  $P_r$ —最小径集 ( $r = 1, 2, \dots, k$ );  $r, s$ —最小径集的序数,  $r < s$ ;  $k$ —最小径集数;  $(1 - q_i)$ —第  $i$  个基本事件不发生的概率;  $X_i \in P_r$ —属于第  $r$  个最小径集的第  $i$  个基本事件;  $X_i \in P_r \cap P_s$ —属于第  $r$  个或第  $s$  个最小径集的第  $i$  个基本事件.

通过对该矿的初步调查及统计,各基本事件的发生概率取值为:

$$q_1 = 0.01; q_2 = 0.2; q_3 = 0.000001; q_4 = 0.000001; q_5 = 0.000001; q_6 = 0.002; q_7 = 0.001; q_8 = 0.6; q_9 = 0.6; q_{10} = 0.000001$$

于是顶上事件的发生概率为:

$$P(T) = 1 + (1 - q_1)(1 - q_2)(1 - q_3)(1 - q_4) [(1 - q_5)(1 - q_6)(1 - q_7)(1 - q_8)(1 - q_9)(1 - q_{10}) - (1 - q_6)(1 - q_7) - (1 - q_5)(1 - q_8)(1 - q_9)(1 - q_{10})] = 0.209$$

## 4 重要度分析与计算

### 4.1 结构重要度

事故树中各基本事件对顶上事件的影响程度是不相同的. 从事故树结构上分析各基本事件的重要度(不考虑各基本事件的发生概率)或假定各基本事件发生概率相等的情况下,分析各基本事件的发生对顶上事件发生的影响程度,叫结构重要度<sup>[2]</sup>. 结构重要度是分析基本事件对顶上事件影响的大小,为改进系统安全性提供重要信息的手段<sup>[4]</sup>.

对所求出的 12 个最小割集,现按一次近似计算得: 因为  $X_1, X_2, X_3, X_4$  是一阶最小割集中的事件,所以  $L_b(1), L_b(2), L_b(3), L_b(4)$  最大. 近似判别式为<sup>[4]</sup>

$$L_b(i) = K_i / 2^{n-1}, \quad (X \in K) \quad (2)$$

式中:  $L_b(i)$ —基本事件  $X_i$  的重要度系数近似判断值;  $K_i$ —包含  $X_i$  的所有割集;  $n$ —基本事件  $X_i$  所在割集中基本事件的个数.

通过 (2) 式计算可得

$$L_b(5) = L_b(8) = L_b(9) = L_b(10) = 1/2^{2-1} + 1/2^{2-1} = 1$$

$$L_b(6) = L_b(7) = 1/2^{2-1} + 1/2^{2-1} + 1/2^{2-1} + 1/2^{2-1} = 2$$

显然有各基本事件的结构重要度系数顺序为:

$$L_b(1) = L_b(2) = L_b(3) = L_b(4) > L_b(6) = L_b(7) > L_b(5) = L_b(8) = L_b(9) = L_b(10)$$

### 4.2 概率重要度

基本事件的结构重要度分析只是按事故树的结构分析各基本事件对顶上事件的影响程度,所以还应考虑各基本事件发生概率对顶上事件发生概率的影响,即对事故树进行概率重要度分析,从而可以确定降低哪个基本事件的概率能迅速有效地降低顶上事件的发生概率.

事故树的概率重要度分析是依靠各基本事件的概率重要度系数大小进行定量分析. 基本事件的概率重要度系数计算公式为<sup>[2]</sup>:

$$I_g(i) = \frac{\partial P(T)}{\partial q_i} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

式中:  $P(T)$ —顶上事件发生概率;  $q_i$ —第  $i$  个基本事件的发生概率.

通过 (3) 式,并联系以上求顶上事件发生概率的计算公式可得

$$I_g(1) = 0.798; I_g(2) = 0.988; I_g(3) = I_g(4) = 0.790; I_g(5) = I_g(10) = 0.000379; I_g(6) = 0.666; I_g(7) = 0.664; I_g(8) = I_g(9) = 0.000949$$

因此,基本事件概率重要度顺序为

$$I_g(2) > I_g(1) > I_g(3) = I_g(4) > I_g(6) > I_g(7) > I_g(8) = I_g(9) > I_g(5) = I_g(10).$$

### 4.3 关键重要度

当各基本事件的发生概率不等时,一般情况下,改变概率大的基本事件比改变概率小的基本事件容

易,关键重要度能从本质上反映各基本事件在事故树中的重要程度.

关键重要度计算公式为<sup>[2]</sup>

$$f_g(i) = \frac{q_i}{P(T)} \cdot I_g(i) \quad (4)$$

式中:  $f_g(i)$ —第  $i$  个基本事件的关键重要度系数;  $I_g(i)$ —第  $i$  个基本事件的概率重要度系数;  $P(T)$ —顶上事件的发生概率;  $q_i$ —第  $i$  个基本事件的发生概率.

通过(4)式计算可得

$$\begin{aligned} f_g(1) &= 0.0470; f_g(2) = 0.941; f_g(3) = f_g(4) = f_g(5) = f_g(10) = 0; \\ f_g(6) &= 0.00633; f_g(7) = 0.00316; f_g(8) = f_g(9) = 0.00272 \end{aligned}$$

因此,基本事件关键重要度顺序为:

$$f_g(2) > f_g(1) > f_g(6) > f_g(7) > f_g(8) = f_g(9) > f_g(3) = f_g(4) = f_g(5) = f_g(10).$$

#### 4.4 分析结果

通过对边坡破坏事故树的定性分析得出,边坡破坏事故树最小割集为12个,最小径集为2个,显然,最小径集比最小割集少,即导致边坡破坏事故的可能性有12种,并通过对顶上事件发生概率的计算,得出顶上事件发生概率为0.209,可见边坡破坏事故是容易发生的.但只要能采取2个径集方案中的任一个,边坡破坏事故就可避免. $P_2$ 多为客观因素,因此 $P_1$ 应为最佳方案.目前该矿的一次爆破炸药量很小,对边坡破坏尚不构成影响,地下水的影响与该区水文地质条件密切相关,属于客观范畴,由于该区水文地质条件较为简单,尚不属于发生边坡破坏的关键所在,可忽略不记.因此,只要能控制台阶崩落,边坡破坏发生的可能性即可降低.

从结构重要度系数分析来看:陡立岩层倾倒破坏、崩落、结构面倾角小于边坡角且大于摩擦角和交线倾角小于边坡角大于内摩擦角的结构重要度系数最大,说明这4个基本事件在事故树结构中的位置最为重要;而针对该矿,在这4个基本事件中,崩落又是最主要的因素,其重要度为最高;另外,在开采过程中,应该严格控制边坡角的大小.其次是一次爆破炸药量偏大和地下水影响,最后是结构面倾角小于摩擦角、散体结构边坡、散体结构边坡且有顺坡向结构面和交线倾角小于内摩擦角.

从概率重要度分析可知:因为概率重要度反映的是顶上事件发生概率的变化率对基本事件发生变化的敏感程度,即降低概率重要度的基本事件的发生概率更能有效地降低顶上事件的发生概率.因此,降低基本事件 $X_2$ 的发生概率,能迅速有效地降低边坡破坏事故的发生概率,其次是基本事件 $X_1, X_3, X_4, X_6, X_7, X_8, X_9, X_5, X_{10}$ ,而最不重要、最不敏感的是基本事件 $X_5$ 和 $X_{10}$ .

从关键重要度分析可知:基本事件 $X_8, X_9$ 是属于客观存在的,尽管发生概率大,但由于敏感性较弱,故其重要度降低了.基本事件 $X_2$ 不仅敏感性较强,而且本身发生概率较大,所以它的重要度仍然为最高.

## 5 结论

在本次安全评价中,通过对云南省某露天矿边坡用事故树进行了分析,得出12个最小割集和2个最小径集,找出了发生边坡破坏的主要因素为崩落、边坡角过大等.说明该露天矿发生边坡破坏是极为可能的.边坡破坏是露天矿的主要隐患,因此,一个稳定的边坡是从设计、开采方法、爆破、边坡治理等多方面所形成的结果.更进一步的安全评价工作是用岩石力学等对边坡的稳定性进行定量计算;而对边坡的地质调查、实验以及稳定性分析是从本质上评价露天矿边坡的主要工作.

#### 参考文献:

- [1] 郑永学. 矿山岩石力学 [M]. 北京:冶金工业出版社, 1995. 94~117.
- [2] 张景林, 崔国璋. 安全系统工程 [M]. 北京:煤炭工业出版社, 2002. 32~76.
- [3] 林福森. 斜井跑车事故的分析及预防 [J]. 工业安全与防尘, 1989, (3): 26~27.
- [4] 国家安全生产监督管理局. 安全评价 [M]. 北京:煤炭工业出版社, 2002. 86~100.