

实验研究

文章编号: 1671- 251X(2010) 11- 0040- 04

基于 FTA 的煤矿瓦斯事故分析

李俊禄¹, 李刚², 车彦峰³

(1. 神东地测公司, 内蒙古鄂尔多斯 017029; 2. 内蒙古科技大学矿业工程学院, 内蒙古包头 014010;
3. 黑龙江龙煤矿业集团股份有限公司鹤岗分公司, 黑龙江鹤岗 154100)

摘要: 给出了事故树分析的步骤, 绘制出了煤矿瓦斯事故树图, 运用事故树分析方法对瓦斯事故进行了逻辑分析; 采用布尔代数法, 找出了煤矿瓦斯爆炸事故发生的最小割集、最小径集; 通过对最小割集(最小径集) 的求解, 确定了基本事件的结构重要度, 从而了解了煤矿的危险程度和安全程度, 掌握了导致瓦斯事故发生的各基本原因事件的组合关系及其重要程度; 给出了防治瓦斯事故发生的措施。

关键词: 煤矿; 瓦斯事故; 瓦斯爆炸; 事故树; 布尔代数法

中图分类号: TD712 **文献标识码:** A

Gas Accident Analysis of Coal Mine Based on FTA

LI Jur lu¹, LI Gang², CHE Yarr feng³

(1. Shendong Ground survey Company, Ordos 017029, China. 2. School of Mining Engineering of Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China.
3. Hegang Branch of Heilongjiang Longmay Mining Group Co., Ltd., Hegang 154100, China)

Abstract: The paper gave steps of fault tree analysis, drew fault tree diagram of mine gas, and made logical analysis for gas accident with FTA method. It found out minimal cut sets and minimal path sets by theory of Boolean algebra law method. It determined importance degree of structure of basic events through solving minimal cut sets and minimal path sets, so as to know degrees of danger and safety of coal mine and combination relation of basic cause events of gas accident and their importance. It also gave prevention measures of gas accident.

Key words: coal mine, gas accident, gas explosion, FTA, Boolean algebra law method

0 引言

随着我国煤矿事业的蓬勃发展, 煤矿事故越来越受到人们的重视。矿山事故中瓦斯事故居首。一旦矿山发生瓦斯事故, 将会造成作业人员的伤亡和国家财产巨大的损失, 所以, 瓦斯的治理显得尤为重要。如今, 很多学者利用系统安全分析的方法对瓦斯事故进行分析, 进而达到预防瓦斯事故发生的

目的。常用的分析方法有事件树分析法(Fault Tree Analysis, 简称 FTA)、事故树分析法、故障类型影响和致命度分析等。

事故树分析法是在系统安全工程中广泛应用的一种重要的安全分析方法。事故树分析是从结果开始, 寻求结果事件(统称顶上事件) 发生的原因事件, 是一种逆时序的分析方法。事故树分析描述了事故发生和发展的直接原因和间接原因及原因的组。可以用其对事故进行定性分析, 辨明事故原因的主次及未曾考虑到的隐患; 也可以进行定量分析, 预测事故发生的概率。由于这种分析方法具有形象直观、思路清晰、逻辑性强等特点, 因而得到了广泛的应用。

收稿日期: 2010- 06- 21

作者简介: 李俊禄(1970-), 男, 内蒙古伊金霍洛旗人, 助理工程师, 经济师, 经济管理师。1990年毕业于内蒙古煤炭工业学校采矿工程专业, 现任神东地测公司经理助理, 主要从事煤矿安全工程管理及经济管理等方面的工作。E-mail: hellolovelg@ 163.com

1 事故树分析的步骤

事故树分析步骤如图1所示。

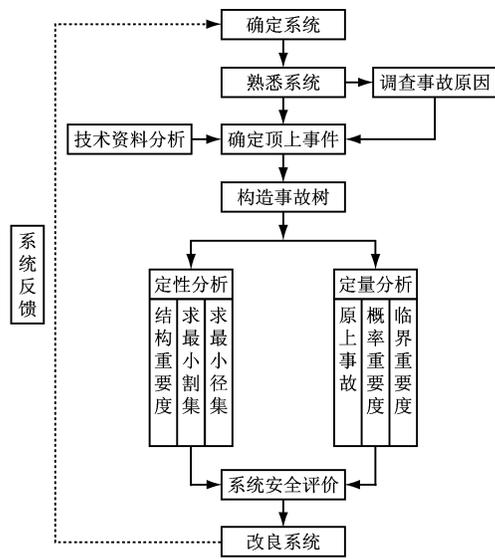


图1 事故树分析步骤

(1) 熟悉系统。要求全面详细地了解系统,包括系统的组成部分、各部分之间的关系、工艺流程、各项参数以及作业环境等情况,必要时画出工艺流程图和布置图。

(2) 调查事故。应尽量广泛地了解所有事故,不仅包括过去已发生的事故,而且也要包括未遂事故和未来有可能发生的事故;不仅包括本系统发生过的事故,也应包括同类系统发生的事故和国外的相似事故。

(3) 确定顶上事件。所谓顶上事件,即人们所不期望发生的事件,也是所要分析的对象事件。对所调查的事故进行全面分析,分析其损失大小和发生的频率,从中找出后果严重且易发生的事故作为顶上事件。顶上事件不能过于笼统,例如不能把“某矿发生事故”作为顶上事件,因为这样无法分析,应选择具体的事故作为分析对象。

(4) 确定目标值。根据以往的事故经验和同类系统的事故资料进行统计分析,得出事故的发生概率(或频率),然后根据这一事故的严重程度,确定要控制的事故发生概率的目标值。

(5) 绘制事故树。找出导致顶上事件发生的中间事件和基本事件及其关系,并加以分析整理。根据以上的资料,从顶上事件起,按照演绎分析的方法,运用逻辑推理,一级一级地找出所有直接原因事件,直至最基本的原因事件为止。按照逻辑关系,用逻辑门连接输入关系,画出事故树图。

(6) 进行定性分析。依据所构造的事故树图,运用布尔代数进行简化,经解算,求出最小割集,最小径集(根据成功树),确定各基本事件的结构重要度并加以分析。

(7) 进行定量分析。根据各基本事件的发生概率求出顶上事件的发生概率,把求出的概率与通过统计分析得出的概率进行比较,如果两者不符,必须重新分析研究已构造出的事故树是否正确完整,各基本原因事件的故障是否估计过高或过低等。

(8) 在定性或定量分析的基础上,根据各可能导致事故发生的基本事件组合(最小割集或最小径集)的可预防的难易程度或重要度,结合本系统的实际能力,制订出具体、切实可行的预防措施,并付诸实际行动。

上述的事故树分析程序包括了定性分析和定量分析两大类。从实际应用而言,由于我国目前尚缺乏设备的故障率和人的失误率的实际资料,故给定量分析带来很大困难或不可能,所以在事故树分析中,目前一般只是进行定性分析。

2 煤矿瓦斯事故分析

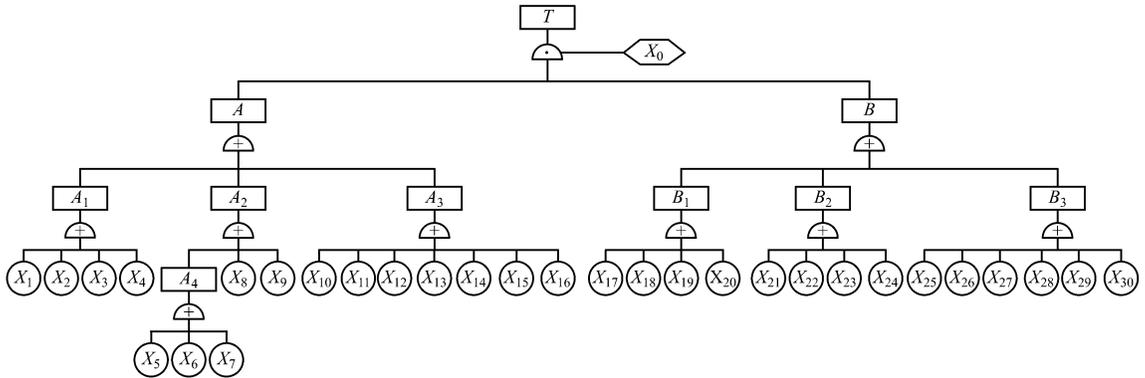
矿井瓦斯是时时刻刻严重威胁着煤矿井下安全生产的自然因素之一。在煤矿井下中,瓦斯灾害主要变现为瓦斯(煤尘)爆炸和煤与瓦斯突出事故。瓦斯爆炸不仅会造成大量的人员伤亡,而且还会严重摧毁矿井设施、中断生产,有时还会引起煤尘爆炸、矿井火灾、井巷垮塌和顶板冒落等二次事故,从而加重灾害后果,使生产难以在短期内恢复。而煤与瓦斯突出不仅能摧毁井巷设施、破坏矿井通风系统,而且使井巷充满瓦斯和煤(岩)抛出物,造成人员窒息、煤流埋人,甚至可能引起瓦斯爆炸与火灾事故。井下煤矿一次死亡人数多的重特大事故主要是瓦斯爆炸事故和煤与瓦斯突出事故。世界上各主要产煤国都不同程度地受到瓦斯灾害的威胁。以煤与瓦斯突出为例,世界上有20个主要产煤国家有煤与瓦斯突出问题,其中,我国的煤与瓦斯突出次数占全世界煤与瓦斯突出总数的1/3以上。另外,我国瓦斯爆炸灾害也相当严重,建国以来煤矿一次死亡百人以上事故有共22起,死亡3500多人,其中瓦斯(煤尘)爆炸事故有20起,死亡3314人,分别占事故总数与死亡人数的94.4%和96.2%。因此,控制瓦斯事故的发生一直是各国主要产煤国煤矿安全的主攻方向之一^[3]。

3 煤矿瓦斯爆炸事故树的编制

井下可能造成瓦斯爆炸的原因的概率统计, 根据事故树编制的基本程序, 绘制瓦斯爆炸事故树图, 如图 2 所示。

事故树是由各种事件、逻辑门连接构造而成的。

对近年来国内大型煤矿瓦斯爆炸事故原因的分析和



- X_0 —氧气浓度适当; X_1 —瓦斯涌出; X_2 —煤与瓦斯突出; X_3 —煤岩与瓦斯突出; X_4 —过断层或破碎带; X_5 —采空区瓦斯大;
- X_6 —采空区涌出; X_7 —上隅角风速低; X_8 —盲巷瓦斯积聚; X_9 —局部瓦斯积聚未处理; X_{10} —主通风机能力不足;
- X_{11} —通风系统设计问题; X_{12} —违反规定的串联通风; X_{13} —作业点风量不足; X_{14} —循环风;
- X_{15} —无瓦斯检测报警装置; X_{16} —瓦斯检测报警位置不当; X_{17} —电缆损坏产生短路; X_{18} —电器设备失爆;
- X_{19} —电器综合保护失效; X_{20} —供电线路老化、漏电; X_{21} —违章井下吸烟; X_{22} —违章打开矿灯;
- X_{23} —违章接头; X_{24} —违章进行井下焊接; X_{25} —静电火花; X_{26} —煤炭自燃火花; X_{27} —井下火灾火花;
- X_{28} —金属撞击火花; X_{29} —违章放炮火花; X_{30} —冒顶岩石撞击火花

图 2 煤矿瓦斯爆炸事故树示意图

4 瓦斯爆炸事故树分析

对瓦斯爆炸事故树作定性分析。定性分析是通过求最小割集(最小径集)的求解, 确定出基本事件的结构重要度, 从而了解系统的危险程度和安全程度, 掌握导致事故发生的各基本原因事件的组合关系及其重要程度。

4.1 求最小割集

最小割集是导致顶上事件发生的最起码的基本事件的组合。用布尔代数化简法求图 2 所示的事故树最小割集的过程如下:

$$T = ABX_0 = (A_1 + A_2 + A_3) \cdot (B_1 + B_2 + B_3) \cdot X_0 = [(X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_4 + X_8 + X_9 + X_{10} + X_{11} + X_{12} + X_{13} + X_{14} + X_{15} + X_{16}) \cdot (X_{17} + X_{18} + X_{19} + X_{20} + X_{21} + X_{22} + X_{23} + X_{24} + X_{25} + X_{26} + X_{27} + X_{28} + X_{29} + X_{30})] \cdot X_0 = [(X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5 X_6 X_7 + X_8 + X_9 + X_{10} + X_{11} + X_{12} + X_{13} + X_{14} + X_{15} + X_{16}) \cdot (X_{17} + X_{18} + X_{19} + X_{20} + X_{21} + X_{22} + X_{23} + X_{24} + X_{25} + X_{26} + X_{27} + X_{28} + X_{29} + X_{30})] \cdot X_0$$

式中: T 为事故树中的顶上事件; A 、 B 、 $A_1 \sim A_4$ 、 $B_1 \sim B_3$ 为事故树中的中间事件; X_i 为事故树中

的基本事件, $i = 0, 1, 2, \dots, 30$ 。

该事故树的最小割集共有 $14 \times 14 = 196$ 组, 说明导致瓦斯爆炸事故发生的可能途径有 196 条, 分别为

- $\{X_1, X_{15}, X_0\}$;
- $\{X_1, X_{16}, X_0\}$;
-
- $\{X_5 X_6 X_7, X_{17}, X_0\}$;
- $\{X_{14}, X_{29}, X_0\}$; 等。

4.2 求最小径集

就实质而言, 径集是割集的对偶。因此, 当事故树某些基本事件的集合不会发生, 顶上事件就不发生, 这种基本事件的集合就称为径集。最小径集是使顶上事件不发生所必须的最低限度的径集。事故树的对偶树就是成功树。其具体做法就是将事故树中所有的与门变成或门, 所有的或门变成与门。经这样的变换, 事故树上每个故障的基本事件和门的对偶都变成成功树的基本事件和门。所求出的成功树的最小割集就是原来事故树的最小径集, 如图 3 所示。

$$T' = A' + B' + X'_0 = A'_1 A'_2 A'_3 + B'_1 B'_2 B'_3 + X'_0 = (X'_1 X'_2 X'_3 X'_4) [(X'_5 + X'_6 + X'_7) X'_8 X'_9] \cdot (X'_{10} X'_{11} X'_{12} X'_{13} X'_{14} X'_{15} X'_{16}) + (X'_{17} X'_{18} X'_{19} X'_{20})$$

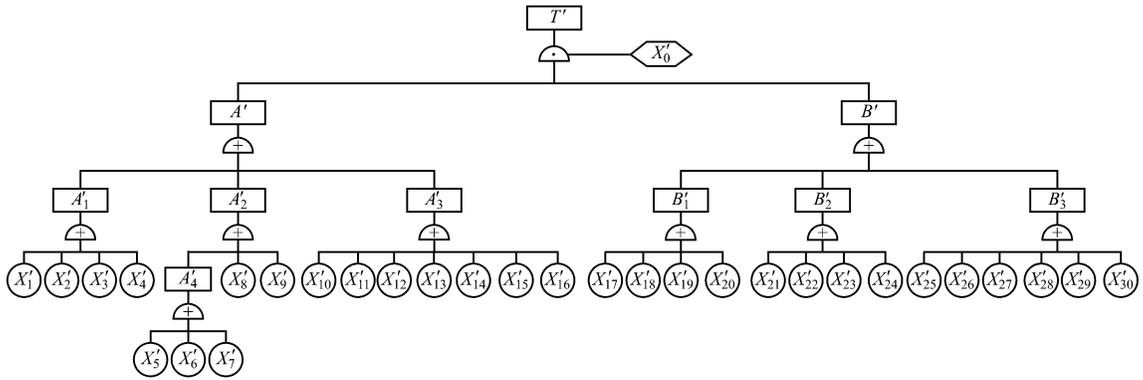


图3 煤矿瓦斯爆炸事故树的成功树示意图

$$(X'_{21}X'_{22}X'_{23}X'_{24})(X'_{25}X'_{26}X'_{27}X'_{28}X'_{29}X'_{30}) + X'_0$$

式中: T' 为事故树中的顶上事件的补事件; A' 、 B' 、 $A'_1 \sim A'_4$ 、 $B'_1 \sim B'_3$ 为事故树中的中间事件的补事件; X'_i 为事故树中的基本事件的补事件。

同理可求出事故树的最小径集有 5 个, 说明预防瓦斯爆炸有 5 个途径, 它们分别为

$$\{X_0\};$$

$$\{X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}, X_{15}, X_{16}\};$$

$$\{X_1, X_2, X_3, X_4, X_6, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}, X_{15}, X_{16}\};$$

$$\{X_1, X_2, X_3, X_4, X_7, X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}, X_{13}, X_{14}, X_{15}, X_{16}\};$$

$$\{X_{17}, X_{18}, X_{19}, X_{20}, X_{21}, X_{22}, X_{23}, X_{24}, X_{25}, X_{26}, X_{27}, X_{28}, X_{29}, X_{30}\}.$$

4.3 求各基本事件的结构重要度

在一棵事故树中, 不同的基本事件所处的地位不同, 则其对顶上事件的影响也不同。根据了解掌握各基本事件的发生对顶上事件发生所产生的影响程度, 对系统的一些重要信息进行修改, 最终达到控制事故发生的目的。所谓结构重要度分析是从事故树结构着手, 通过分析得到各基本事件的重要程度。人们把各基本事件在事故结构上的重要程度称为结构重要度。

结构重要度($I_{(j)}$)的分析有多种方法, 此处采用排列法求解, 求解结果排列顺序如下:

$$I_{(0)} > I_{(1)} = I_{(2)} = I_{(3)} = I_{(4)} = I_{(8)} = I_{(9)} = I_{(10)} = I_{(11)} = I_{(12)} = I_{(13)} = I_{(14)} = I_{(15)} = I_{(16)} > I_{(17)} = I_{(18)} = I_{(19)} = I_{(20)} = I_{(21)} = I_{(22)} = I_{(23)} = I_{(24)} = I_{(25)} = I_{(26)} = I_{(27)} = I_{(28)} = I_{(29)} = I_{(30)} > I_{(5)} = I_{(6)} = I_{(7)}$$

5 结论

(1) 从事故树结构上来看, 导致瓦斯爆炸事故

的基本事件有 31 个, 这些事件的相互结合都可能导致事故的发生。而且, 这些事件涉及到方方面面, 控制起来存在诸多的困难, 因此, 对系统的危险性应给予足够重视。

(2) 从最小割集和最小径集的组数来看, 最小割集有 196 组, 最小径集有 5 组。即顶上事件可能发生的条件有 196 条, 预防的措施有 5 条, 并且最小径集中包含的基本事件比较少, 而最小割集所包含的基本事件却很多, 所以瓦斯爆炸事故是极易发生且难以控制的事件。

(3) 从结构重要度来看。氧气浓度 $I_{(0)}$ 适当, 所占比例最大, 在井下正常生产中是始终满足的。其次是瓦斯涌出 $I_{(1)}$ 、煤与瓦斯突出 $I_{(2)}$, 说明它们在瓦斯爆炸事故中占的比例较大。因此, 需针对这些方面对系统进行修改, 如预先对煤层进行瓦斯抽放等。除此之外, 还应加强安全方面的管理。

(4) 应采取如下瓦斯防治措施:

- ① 建立瓦斯抽放设施, 对煤层进行瓦斯抽放, 以达到安全生产的条件;
- ② 使用本质安全型机械设备, 杜绝明火的存在;
- ③ 加强对采空区的管理, 必要时安装局部通风设施;
- ④ 建立健全安全生产操作规程和安全生产责任制; 做到有章可依, 有章必依;
- ⑤ 优化通风系统;
- ⑥ 建立瓦斯检测报警系统;
- ⑦ 加强职工的培训和管理, 提高作业人员的安全意识。

参考文献:

- [1] 周世宁, 林柏泉. 煤矿瓦斯动力灾害防治理论及控制技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [2] 沈斐敏. 安全系统工程理论与应用[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2001.
- [3] 胡殿明, 林柏泉. 煤层瓦斯赋存规律及防治技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2006.