

文章编号:1000-582x(2001)04-0086-05

矿井瓦斯爆炸危险性定量分析

刘立平¹, 林登发², 何朝远³

(1. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400044;
2. 重庆市高等级公路监理公司, 重庆 400060; 3. 煤炭科学研究总院 重庆分院, 重庆 400030)

摘要: 矿井瓦斯爆炸后果极为严重, 如果能在事前对瓦斯爆炸的危险性进行可靠评价, 将对瓦斯爆炸预防和矿井安全生产具有重要的现实意义。但目前所采用的方法主要是定性分析, 而很难给出一个定量指标。作者采用事故树分析方法, 首先确定引起矿井瓦斯爆炸的中间事件和基本事件, 采用专家评定法确定各基本事件概率, 在此基础上, 利用自行开发的软件包分析了各基本事件的概率重要度和临界重要度, 最后得出了矿井瓦斯爆炸的概率, 并给出了矿井瓦斯爆炸危险性定量分析的实例。

关键词: 瓦斯爆炸; 事故树分析; 定量分析

中图分类号: TD 712⁺.72

文献标识码: A

迄今为止, 煤炭仍是我国第一大能源, 占一次性能源的70%左右。我国煤炭年产量已近12亿吨。由于我国煤炭分布范围广泛, 埋藏地形复杂, 煤炭生产一直受到各种灾害, 如瓦斯、涌水、火灾、煤尘及冒顶等的威胁, 其中尤以瓦斯爆炸事故后果最为严重。如果能在事前对瓦斯爆炸的危险性进行正确评价, 将对瓦斯爆炸预防和矿井生产具有重要的现实意义。对矿井瓦斯爆炸危险性分析方法很多, 而以事故树分析(Fault Tree Analysis)应用最广。由于定量分析中基本事件的概率难以确定以及定量分析计算的复杂性, 目前主要采用定性分析。作者在基本事件概率研究的基础上, 利用微机技术实现了矿井瓦斯爆炸危险性的定量分析。

1 矿井瓦斯爆炸危险性定量分析理论基础

要进行矿井瓦斯爆炸危险性定量分析必须要进行如下的工作: 矿井瓦斯爆炸基本事件的选择; 基本事件概率的确定; 事故树最小割集的计算和定量分析。定量分析的内容有: 顶上事件概率、各基本事件的概率重要度和各基本事件的临界重要度的计算^[1,2]。下面简单介绍矿井瓦斯爆炸危险性定量分析的理论基础。

1.1 事故树分析图的确定

首先找出矿井瓦斯爆炸的中间事件和基本事件,

根据各事件间逻辑关系, 得出事故树分析图。

1.2 最小割集的求解

在事故树分析图基础上, 采用“自上而下替代法”来求解最小割集。即“或门(OR)增加割集数目, 与门(AND)增加割集内基本事件数目”, 从顶上事件开始, 将每个门下的事件逐一进行替代, 直到所有的门均由基本事件代替为止, 在割集中所有基本事件均不相同的为最小割集。

1.3 基本事件概率的计算

基本事件概率计算采用 Delphi 方法, 即专家评分方法。基本事件 m 的概率按下式计算:

$$p_m = \sum_{i=1}^n R_i C_i^m \quad (1)$$

式中 p_m 表示基本事件 m 的概率, n 为专家数, R_i 为第 i 个专家的相对权重, C_i^m 为第 i 个专家对基本事件 m 的评分。

1.4 顶上事件概率

顶上事件概率采用如下计算式:

$$Q = (q_{E1} + q_{E2} + q_{E3} + \dots + q_{EK}) - (q_{E1}q_{E2} + q_{E1}q_{E3} + q_{E2}q_{E3} + \dots + q_{E(K-1)}q_{EK}) + (q_{E1}q_{E2}q_{E3} + \dots + q_{E(K-2)}q_{E(K-1)}q_{EK}) - \dots + (-1)^{K-1} q_{E1}q_{E2}\dots q_{EK} \quad (2)$$

• 收稿日期: 2000-12-08

作者简介: 刘立平(1971-), 男, 安徽太湖人, 讲师, 博士。主要从事岩土工程、结构工程、抗震防灾等科研和教学工作。

式中： Q 为顶上事件概率； K 为最小割集数； q_{E_j} 为第 j 个最小割集发生的概率， $q_{E_j} = \prod_{i=1}^l q_i$ ($j = 1, 2, \dots, k$)； l 为第 j 个最小割集的基本事件数； q_i 为基本事件概率。由于上式是布尔代数运算，在计算概率积时，要消除重复概率因子。

1.5 概率重要度

概率重要度 $I_{p(i)}$ 用来判断各基本事件变化对顶上事件发生概率变化的影响大小。采用如下计算式：

$$I_{p(i)} = \frac{\partial Q}{\partial q_i} \quad (3)$$

1.6 临界重要度

临界重要度 $I_{c(i)}$ 是采用相对变化率的比值来衡量基本事件的重要度。即用基本事件发生概率变化率与顶上事件发生概率变化率的比值来确定基本事件的重要度，采用如下计算式：

$$I_{c(i)} = \frac{q_i}{Q} I_{p(i)} \quad (4)$$

2 定量分析的程序设计

矿井瓦斯爆炸危险性定量分析涉及大量的数值运算，对基本事件较多的情况很难由手工获得结果，特别是最小割集的计算^[3]。我们利用计算机技术^[4,5]，编写了矿井瓦斯爆炸危险性定量分析的软件包，其具有事故树分析图自动生成，最小割集求解，顶上事件概率、各基本事件的概率重要度和各基本事件的临界重要度计算等功能，并能打印事故树分析图和各计算结果。根据上述的理论基础，采用结构化程序设计，部分模块流程图如图1和图2所示。

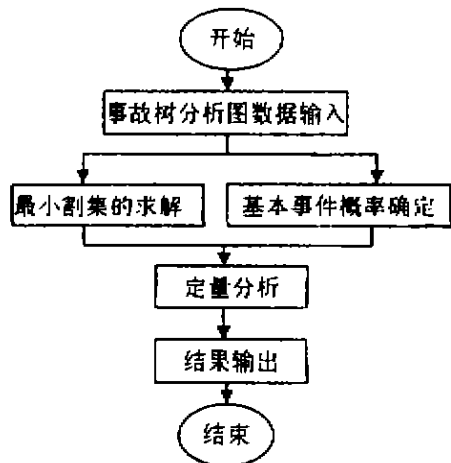


图1 主控模块程序结构

3 矿井瓦斯爆炸危险性定量分析

一般来说矿井各个采煤(掘进)工作面，相互间是相对独立的，不考虑二次事故，可将它们视作一些相互独立的评价单元。可将其划分为机采、炮采、机掘和炮掘等4个评价单元分别进行定量分析。下面以某矿井炮采面为例进行瓦斯爆炸危险性定量分析。

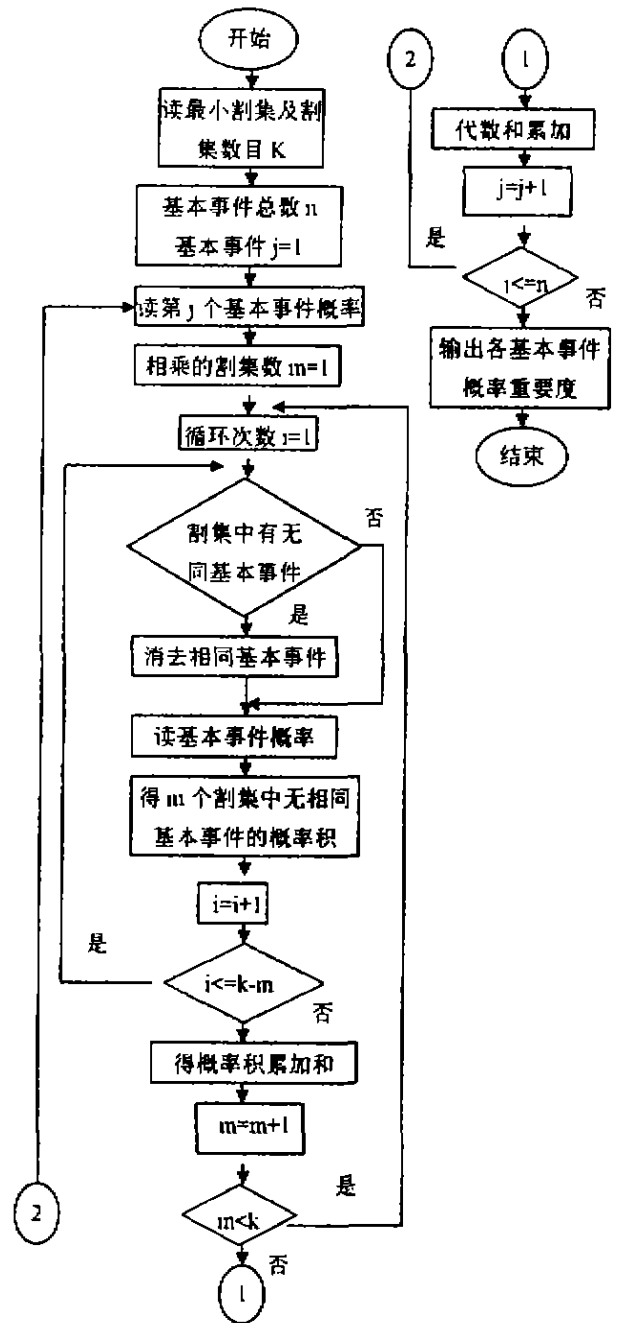


图2 概率重要度模块程序结构

表1 炮采面瓦斯爆炸基本事件及概率、计算结果

代码	基本事件名称	基本事件概率	概率重要度	临界重要度
X101	相遇	0.35	0.35	1.00
X102	达到爆炸浓度	0.08	1.46	1.00
X103	达到引燃能量	0.08	1.46	1.00
X104	通风能力不够	0.31	0.02	0.05
X105	风路调配不合理	0.27	0.02	0.04
X106	一次落煤过大造成瓦斯大	0.20	0.02	0.03
X107	挖顶距过大造成风速低	0.20	0.02	0.03
X108	瓦斯抽放率低	0.19	0.02	0.03
X109	回采速度慢	0.14	0.02	0.02
X110	资源回收率低	0.14	0.02	0.02
X111	没按时检查瓦斯	0.29	0.02	0.05
X112	报警断电极位置不当	0.22	0.02	0.04
X113	报警断电极失灵	0.24	0.02	0.04
X114	巷道内瓦斯积聚未及时发现	0.28	0.02	0.04
X115	巷道内瓦斯积聚未及时处理	0.28	0.02	0.05
X116	瓦斯涌出大	0.23	0.02	0.04
X117	地质变化造成瓦斯涌出大	0.24	0.02	0.04
X118	地质构造复杂	0.21	0.02	0.03
X119	自燃发火期短	0.18	0.02	0.03
X120	有突出煤层	0.21	0.02	0.03
X121	瓦斯解析速度快	0.17	0.02	0.03
X122	无施工设计	0.23	0.02	0.04
X123	无作业安全规程	0.25	0.02	0.04
X124	作业安全规程未得到认真执行	0.26	0.02	0.04
X125	放炮前检查瓦斯制度未认真执行	0.31	0.02	0.05
X126	班组安全员未认真培训	0.21	0.02	0.03
X127	安全员不认真负责	0.23	0.02	0.04
X128	安全例会未明确规定或未执行	0.18	0.02	0.03
X129	安检制度未明确规定,认真执行	0.22	0.02	0.04
X130	未认真整改检查出的安全问题	0.27	0.02	0.04
X131	磨擦火花	0.50	0.02	0.06
X132	静电火花	0.20	0.02	0.02
X133	吸烟	0.28	0.02	0.03
X134	喷焊	0.24	0.02	0.03
X135	电焊	0.24	0.02	0.03

X136	气焊	0.24	0.02	0.03
X137	炸药雷管不为煤矿产品	0.27	0.02	0.03
X138	炮线虚接打火	0.26	0.02	0.03
X139	反向爆破	0.20	0.02	0.02
X140	劣质电缆短路火花	0.24	0.02	0.03
X141	炮眼未掏尽煤粉	0.18	0.02	0.02
X142	炮眼装药不连续	0.17	0.02	0.02
X143	炮眼装药量超过规定	0.21	0.02	0.03
X144	残药火焰	0.26	0.02	0.03
X145	封泥不足	0.27	0.02	0.03
X146	放明炮,糊炮	0.30	0.02	0.04
X147	抵抗线不足	0.24	0.02	0.03
X148	放炮器起火	0.25	0.02	0.03
X149	炸药变质或受潮	0.21	0.02	0.03
X150	导火索起爆	0.24	0.02	0.03
X151	放连环炮	0.23	0.02	0.03
X152	放炮母线裸露打火	0.27	0.02	0.03
X153	设备失爆	0.27	0.02	0.03
X154	煤电钻出火	0.28	0.02	0.03
X155	开关透头	0.22	0.02	0.03
X156	起爆器出火	0.24	0.02	0.03
X157	矿灯失爆火花	0.27	0.02	0.03
X158	电缆短路	0.25	0.02	0.03
X159	带电维修	0.31	0.02	0.04
X160	放炮员未严格执行有关规定	0.27	0.02	0.03
X161	所用电器未过到完好标准	0.23	0.02	0.03
X162	电缆未按规定选用、联结和管理	0.21	0.02	0.03

顶上事件概率:0.12

3.1 炮采面瓦斯爆炸事故树分析图的建立

大量事故案例表明,矿井瓦斯爆炸事故由矿井地质条件、开采技术条件、矿井生产过程中的组织和个人因素等造成。瓦斯爆炸必须具备两个条件:瓦斯积聚和火源。经过对煤矿现场调研,80年代至90年代150起煤矿瓦斯爆炸案例分析及科研院所专家的咨询确定炮采面瓦斯爆炸的中间事件和基本事件。其中间事件为:通风状况、开采工艺、瓦斯检查、地质因素、明火、放炮火焰、电器火花和安全管理。基本事件如表1所示。根据中间事件与基本事件之间的关系,利用自行编制的软件包自动生成事故树分析图。

3.2 炮采面瓦斯爆炸基本事件概率的分析

由于瓦斯爆炸破坏性很强,事故现场难以保护,这

给事后分析事故原因带来困难,因此历次事故真正原因不是很准确;又由于长期以来我国对设备故障率未作统计分析,很难收集这方面资料。因此瓦斯爆炸基本事件具有模糊性。在此采用请有关专家对瓦斯爆炸影响程度作自然语言判断,然后采用 Delphi 法将这些自然语言数字化,根据各专家判断并考虑各专家的权重得到各基本事件概率。

对某一基本事件的影响程度,可用自然语言集 $A = \{ \text{很大, 大, 一般, 小, 很小} \}$ 中的一个值表示。根据 Delphi 方法,将自然语言集 A 映射成相应的数值集 $C = \{ 0.35, 0.26, 0.19, 0.12, 0.08 \}$ 。

为了使专家意见尽可能与实际情况一致,应选择多层次、多结构的专家。在专家的选择上考虑了职称、学历、本专业工作年限、年龄和所从事的工作的 5 个方面的因素,每个因素又细分为 3-6 个级别。采用判断矩阵法来确定各因素的权重,最后计算出各专家的权重。根据公式(1)计算出各基本事件的概率如表 1 中所示。

3.3 最小割集求解和定量分析

采用自行开发的软件包计算的炮采面瓦斯爆炸的最小割集如表 2 所示。定量分析结果,包括顶上事件概率、各基本事件的概率重要度和各基本事件的临界重要度如表 1 所示。

表 2 最小割集清单

最小割集数目为:864	
序号	最小割集
1	{X104 X133 X101 X102 X103
2	{X106 X133 X101 X102 X103
3	{X111 X133 X101 X102 X103
4	{X116 X133 X101 X102 X103
5	{X122 X133 X101 X102 X103
6	{X105 X133 X101 X102 X103
7	{X104 X137 X101 X102 X103
8	{X104 X153 X101 X102 X103
9	{X104 X160 X101 X102 X103
10	{X104 X131 X101 X102 X103
.....	
100	{X107 X153 X101 X102 X103
.....	
863	{X130 X161 X101 X102 X103
864	{X130 X162 X101 X102 X103

3.4 炮采面瓦斯爆炸定量分析结果

通过以上分析,可以看出炮采面瓦斯爆炸的最小

割集数多达 864,即炮采面发生瓦斯爆炸的可能性有 864 种途径。但虽然有如此多的途径,但真正发生爆炸的可能性还是较小,其概率仅为: 0.12(顶上事件概率)。从表 1 可以发现 X101, X102, X103 3 个基本事件概率在所有基本事件中不是最大的,且 X102 和 X103 的概率最小,但它们的概率重要度和临界重要度却最大,也就是说它们对炮采面瓦斯爆炸发生概率的变化影响最大。因此基本事件概率并不能反映爆炸可能性大小,而基本事件的概率重要度和临界重要度却能反映爆炸可能性。如果采取有效措施减少这 3 个事件的概率会有效地降低矿井瓦斯爆炸的可能性。

4 结束语

通过研究,得出以下结论:

- 1) 矿井瓦斯爆炸定量分析十分必要,具有量化矿井瓦斯爆炸的可能性,为防止瓦斯爆炸提供量化指标,可以找出对瓦斯爆炸发生影响最大的基本事件;
- 2) 经过对煤矿现场调研、80 年代至 90 年代 150 起煤矿瓦斯爆炸案例分析及科研院所专家的咨询确定了炮采面瓦斯爆炸的中间事件和基本事件。其不仅是本文的重要工作,也为以后类似的研究提供参考;
- 3) 采用 Delphi 法确定各基本事件概率是可行的;
- 4) 自行编制了矿井瓦斯爆炸定量分析软件包,能自动生成事故树分析图及各种定量分析。为实现事故树定量分析提供了工具,对矿井瓦斯爆炸的预防和矿井生产具有重要的指导意义。

参考文献:

- [1] 沈斐敏. 安全系统工程基础与实践[M]. 北京:煤炭工业出版社,1991.
- [2] 武汉安全与环保研究院译,安全系统工程学(2)[M]. 武汉:武汉出版社,1985.
- [3] 施式亮. 瓦斯爆炸事故树的微机分析模型及应用程序[J]. 西安矿业学院学院, 1995, 15(2):113-117.
- [4] 史惠康. Visual C++ 5.0 实用编程技术[M]. 北京:中国水利水电出版社,1998.
- [5] 齐舒创作室. Visual C++ 6.0 用户界面制作技术与应用实例[M]. 北京:中国水利水电出版社,1998.

The Quantitative Analysis of the Fatalness of the Methane Explosion in Coal Mines

LIU Li-ping, LIN Deng-fa, HE Chao-yuan

(Department of civil engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: If the quantitative index of the methane explosion in coal mines before exploding can be calculated, the measure will be take to prevent the methane explosion. The methods using in the analysis of the fatalness of the methane explosion are almost qualitative analysis. In this paper the quantitative analysis of the fatalness of the methane explosion in coal mines is achieved on the basis of the research of the essence event probability with the method of fault tree analysis using the micro-computer. The practical example of the quantitative analysis of the fatalness of the methane explosion in coal mines is given.

Key words: methane explosion; fault tree analysis; quantitative analysis

(责任编辑 钟学恒)

~~~~~  
{上接第 77 页}

## Damage Analysis on Coal and Rocks and the Method of the Checking Damage by the Deviator Stress

CAO Shu-gang, XIAN Xue-fu

(College of Resource & Environment Science, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** The characteristic of the original damage and the breaking of the coal and rocks under the loading has been discussed by a lot of microscopic structure analysis and by whole stress-strain testing on the coal and rocks. The non-homogeneity causes the stress locating in a small spot. It is the essential cause of the damage developing and causing the structure breaking of the coal rocks. The failure of brittle fracturing, rubbing later on and granulating should be a major pattern in the outburst of coal and gas. The method of the examining damage by the deviator stress, is proposed. It can be used to analyse the characteristic of the coal and rocks.

**Key words:** rock; experiment; damage; method of the detecting

(责任编辑 钟学恒)