

# 应用 FTA 分析瓦斯隧道在建期瓦斯爆炸事故

陈沅江<sup>1</sup>,程刚<sup>1</sup>,熊建明<sup>2</sup>

1. 中南大学资源与安全工程学院,长沙 410083
2. 中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院,北京 100083

**摘要** 道路交通工程中的瓦斯隧道建设存在瓦斯爆炸的重大危险,其影响因素十分复杂。分析国内外典型隧道瓦斯爆炸事故,获得导致隧道瓦斯爆炸的危险源;运用事故树理论,建立隧道瓦斯爆炸事故树模型,计算事故发生的最小割集和最小径集,发现导致瓦斯爆炸有 380 种途径,预防瓦斯爆炸事故有 2 个集合;计算事故树结构重要度,认为防止隧道瓦斯爆炸事故的重点应放在机电管理缺陷和瓦斯管理缺陷上;最后制定了瓦斯隧道在建期瓦斯爆炸事故预防措施。分析结果表明,在防治瓦斯隧道瓦斯爆炸事故中应把防止瓦斯积聚放在首位,控制引爆火源其次,以瓦斯隧道安全施工管理为基础。

**关键词** 隧道;瓦斯爆炸;事故树分析;预防措施

**中图分类号** X924.4

**文献标识码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.24.007

## Accident Analysis of Gas Explosion in Constructing Gas Tunnel by Using FTA

CHEN Yuanjiang<sup>1</sup>, CHENG Gang<sup>1</sup>, XIONG Jianming<sup>2</sup>

1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China
2. School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China

**Abstract** The gas tunnel of the road traffic engineering in its construction stage faces the gas explosion risk, with very complex influencing factors. The typical tunnel gas explosions both at home and abroad are analyzed, to explore the sources of the gas explosion hazard. Through the FTA theory, an FAT model of the tunnel gas explosion is built, the minimum cut sets and the minimum path sets of accidents are computed, 380 ways leading to the gas explosion and 2 sets preventing the gas explosion are identified. The FTA important structure is computed, the faulty electromechanical and gas managements are considered as the main issues in considering the prevention of the tunnel gas explosion. Finally the countermeasures to prevent tunnel gas explosion are established. It is shown that in the prevention and control of the gas explosion, the prevention of the gas accumulation should be put in the first place, and the control of the spark origin in the second place, based on the safety construction management of the gas tunnel.

**Keywords** tunnel; gas explosion; FTA; preventive measures

### 0 引言

中国是一个多山的国家,交通工程建设往往通过很多山岭重丘区,因此需要修建大量的隧道。隧道工程建设中,有时要穿过煤层或赋存瓦斯的地区,如中国近年修建的云台山隧道、华莹山隧道、云顶隧道、天台寺隧道、董家山隧道、岩脚寨隧道、炮台山隧道等<sup>[1]</sup>。这些隧道在施工过程中遇到过瓦斯燃

烧、瓦斯爆炸和瓦斯突出的危险。这其中瓦斯爆炸事故比较常见,一旦发生,其破坏性和毁灭性极强,会造成严重的人员伤亡和重大的财产损失<sup>[2]</sup>。

随着隧道施工期瓦斯爆炸事故的不断增加,人们逐渐认识到防范和减轻瓦斯爆炸事故的重要性,有必要对隧道瓦斯爆炸事故进行系统、全面的分析,找到引起瓦斯爆炸的根本原

收稿日期:2012-05-17;修回日期:2012-07-05

基金项目:交通部西部交通科技中心项目(200831878518)

作者简介:陈沅江,副教授,研究方向为岩土与环境工程安全,电子信箱:yuanjiang\_chen@126.com

因,从而对其进行有效控制。为此,本文将安全系统工程学中的事故树分析法(Fault Tree Analysis, FTA)引入到隧道瓦斯爆炸事故分析中,探讨隧道瓦斯爆炸事故发生的深层原因,以期为施工过程中防范瓦斯爆炸事故提供有力指导。

### 1 隧道瓦斯爆炸事故树分析法的规范化流程

从安全系统工程分析原理出发,隧道瓦斯爆炸事故树分析遵循如下操作流程。首先,充分了解隧道瓦斯爆炸事故信息,收集历年来隧道瓦斯爆炸事故的有关资料,同时参考煤矿瓦斯爆炸事故的有关内容。其次,从人员、机械、环境和信息等方面,调查与事故有关的所有因素。再次,根据调查整理的资料,从顶事件起进行演绎分析,一级一级绘制成反映因果关系的树形图,然后对事故树进行定性、定量分析。最后,

在对隧道瓦斯事故定性分析的基础上,根据最小割集、最小径集、可预防的难易程度和结构重要度,制定适合隧道施工预防瓦斯爆炸事故的措施,并付诸实施<sup>[3]</sup>。具体操作流程如图1所示。

由图1可见,定量分析的工作量大,它需要各基本事件的发生概率,但公开的隧道瓦斯爆炸事故的资料很不完整,特别是缺乏引起隧道瓦斯爆炸基本事件的事故率和操作失误率的相关统计。如果采用煤矿瓦斯爆炸基本事件的事故率,准确性欠佳。因为煤矿主要任务是采煤,瓦斯溢出和瓦斯突出的可能性较大,而隧道建设要尽可能地避开煤层地系,瓦斯溢出和突出的可能性比煤矿小,故两者的事故率有所不同<sup>[4]</sup>。本文在事故树分析中,先进行定性分析,事故率和操作失误率问题将在后续的工作中进一步探讨。

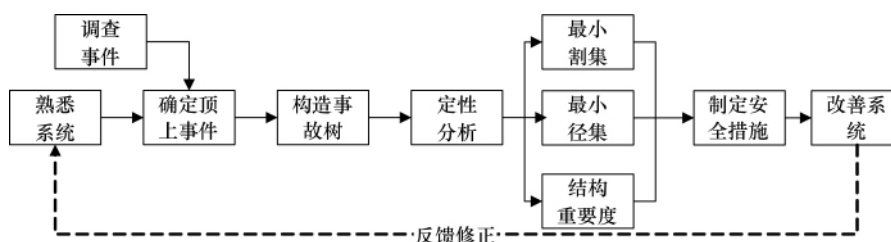


图1 事故树分析程序

Fig. 1 FTA program

## 2 国内外典型瓦斯隧道爆炸事故原因分析

### 2.1 国内外瓦斯隧道瓦斯爆炸事故情况

据不完全统计,2000年至今,中国修建的瓦斯隧道已有100余座,且以高瓦斯隧道为主(53座),主要分布在西部山区,环境条件相当恶劣<sup>[5]</sup>。

目前中国发生重大瓦斯爆炸事故的隧道共有4座,分别是岩脚寨隧道、炮台山隧道、213国道龙眼睛隧道及董家山隧道。中国修建的隧道发生瓦斯爆炸的概率较小,可是一旦发生爆炸事故,其后果往往非常严重;国外在隧道建设过程中也发生过瓦斯爆炸事故,并且造成了严重后果,具体见表1。

表1 国内外重大瓦斯爆炸事故情况

Table 1 Major gas explosion accidents at home and abroad

区域	隧道名称	瓦斯爆炸原因	事故后果
国外	Sylmar 隧道	电气设备漏电引起爆炸	17人死亡
	Port Huron 隧道	点火源引爆	22人死亡
	Great Apennine 隧道	—	97人死亡,停工7个月
	Akosombo 坝引水隧道	焊接引起爆炸	11人死亡
	Hongrin 引水隧道	通风设备故障	5人死亡
	Chingaza 引水隧道	大量瓦斯涌出	人员死亡(具体数字不详)
	EIColegio 隧道	大量瓦斯涌出	至少发生5次爆炸
国内	岩脚寨隧道	大量瓦斯涌出遇高温明火	34人死亡,65人受伤
	炮台山隧道	照明灯爆炸和汽车引发	13人受伤
	董家山隧道	瓦斯异常涌出,电线短路引发爆炸	44人死亡,11人受伤,直接经济损失2035万元
	213国道龙眼睛隧道	放炮不合理,隧道塌方,导致瓦斯大量泄漏	2人死亡,61人受伤,2人失踪

### 2.2 瓦斯隧道瓦斯爆炸事故原因分析

引起瓦斯爆炸事故的原因很多。从横向看,瓦斯爆炸必须具备一定的条件,即隧道内空气中CH<sub>4</sub>的浓度必须在5%—16%之间、要有一定的引燃温度(510—810℃)、O<sub>2</sub>含量大于

等于12%。从纵向看,瓦斯爆炸是由于管理缺陷和设计不合理(人员)、机械故障和通风不足(机械)、不可避免的自然因素(环境)引起的。横、纵向相结合可以总结出隧道内引起瓦斯爆炸事故的主要危险源<sup>[6-7]</sup>,如表2所示。

表 2 隧道瓦斯爆炸事故主要危险源分析

Table 2 Major risk analysis of tunnel gas explosion

瓦斯爆炸原因	CH <sub>4</sub> 浓度超标	点火源
管理缺陷和设计不合理(人员)	瓦斯管理缺陷,无计划的停风停电,设备检修,违章或错误操作,多余横通道未及时封闭,横通道未设两道风门,两工作面串联通风,瓦斯易积聚区域无局部通风,没有按时检查瓦斯浓度,警报断电仪位置不当,高瓦斯煤层没有进行瓦斯抽排	未使用煤矿许用炸药,炮眼深度不足,黏土炮泥封堵不实,非矿发爆器放炮,隧道内电焊气焊,隧道内吸烟,带电检修,电器焊接工艺不合格,电线接线方式不良,机电管理缺陷,使用非矿用电器设备
机械故障和通风不足(机械)	风机故障,风筒漏风,通风设施不完善,通风量不足,风速不够,警报断电仪失灵	母线漏电,机械摩擦,各种撞击,电器失爆,静电,电缆受损,变压器、开关短路
不可避免的自然因素(环境)	瓦斯突出,石门揭开煤层,掌子面通过地质构造带	煤自燃,雷电

### 3 瓦斯隧道瓦斯爆炸事故的 FTA 分析

以隧道瓦斯爆炸事故为顶上事件,将分析获得的瓦斯隧

道爆炸事故主要危险源作为原因事件,按 FTA 分析原理,构建隧道瓦斯爆炸原因分析事故树,如图 2 所示。

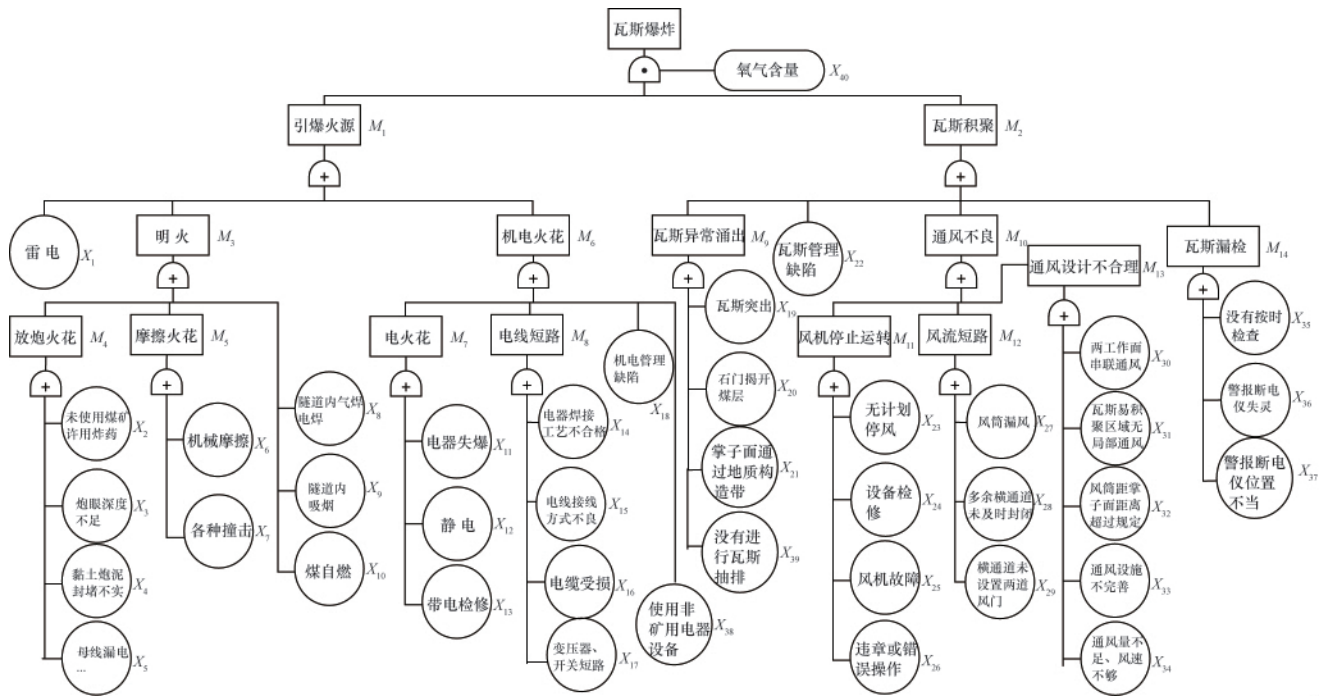


图 2 隧道瓦斯爆炸事故树

Fig. 2 FTA of tunnel gas explosion

#### 3.1 事故树最小割集的确定

最小割集是指能够引起顶上事件发生的最低数量的基本事件的合集。用布尔代数化简法,化简隧道瓦斯爆炸事故树得出 380 个最小割集,即有 380 条途径可以导致瓦斯爆炸事故,它们分别是:  $\{X_{10}, X_{39}, X_{40}\}$ ,  $\{X_{13}, X_{39}, X_{40}\}$ ,  $\{X_1, X_{39}, X_{40}\}$ ,  $\{X_5, X_{26}, X_{40}\}$ , ...,  $\{X_2, X_{34}, X_{40}\}$ ,  $\{X_7, X_{37}, X_{40}\}$ ,  $\{X_6, X_{36}, X_{40}\}$ ,  $\{X_6, X_{37}, X_{40}\}$ 。

不难看出,导致顶上事件发生的模式有 380 种,如果要想使瓦斯爆炸事故不发生,即需要控制 380 个最小割集。可见,瓦斯隧道施工过程中瓦斯爆炸的引发因素很多,若在施工期

不注重施工安全的话,瓦斯隧道内发生瓦斯爆炸危险的可能性是很大的。

#### 3.2 事故树最小径集的确定

根据最小径集与最小割集的对偶性,将图 2 中事故树的与门换成或门,或门换成与门转换成如图 3 所示的成功树。

再次利用布尔代数化简法,化简成功树,获得瓦斯爆炸事故的最小径集如下。

径集 1:  $\{X_2, X_{11}, X_1, X_{14}, X_{18}, X_{38}, X_{15}, X_{16}, X_{17}, X_6, X_8, X_9, X_{10}, X_{12}, X_{13}, X_7, X_3, X_4, X_5\}$ , 它由 19 个基本事件构成;

径集 2:  $\{X_{19}, X_{23}, X_{35}, X_{22}, X_{27}, X_{30}, X_{36}, X_{37}, X_{28}, X_{29}, X_{31}, X_{32},$

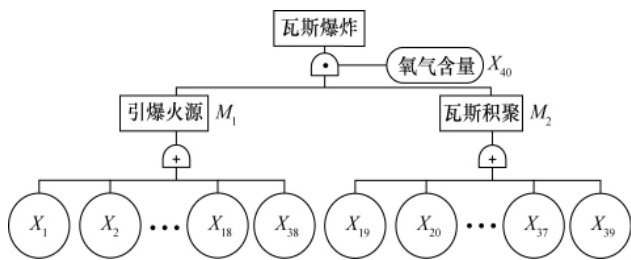


图3 隧道瓦斯爆炸成功树

Fig. 3 Successful FTA of tunnel gas explosion

$X_{33}, X_{34}, X_{20}, X_{21}, X_{39}, X_{24}, X_{25}, X_{26}$ ，它由 20 个基本事件构成；

径集 3:  $\{X_{40}\}$ ，它由 1 个基本事件构成。

虽然控制  $X_{40}$ ，即氧气含量，是使顶上事件不发生最有效的方法，但是控制  $X_{40}$  不切实际。所以，有效的最小径集为两个，即控制  $M_1$  (引爆火源) 和  $M_2$  (瓦斯积聚) 中各基本事故不发生。

### 3.3 事故树结构重要度分析

事故树结构重要度计算公式为

$$I_{\phi(i)} = \frac{1}{k} \sum_{n_j} \frac{1}{n_j} \quad j \in k_j \quad (1)$$

其中,  $k$  为最小割集总数;  $k_j$  为第  $j$  个最小割集;  $n_j$  为第  $j$  个最小割集的基本事件数。

通过计算得出瓦斯爆炸事故树中的结构重要度顺序为

$$I(40) > I(22) = I(1) > I(18) > I(38) > I(6) = I(7) > I(27) = I(28) = I(29) = I(35) = I(36) = I(37) > I(8) = I(9) = I(10) = I(11) = I(12) = I(13) > I(19) = I(20) = I(21) = I(39) = I(23) = I(24) = I(25) = I(26) > I(2) = I(3) = I(4) = I(5) = I(14) = I(15) = I(16) = I(17) > I(30) = I(31) = I(32) = I(33) = I(34)。$$

可以看出，在基本事件中，氧气含量的结构重要度最高，但是控制氧气含量不符合实际，故不考虑。雷电、瓦斯管理缺陷、机电管理缺陷、使用非矿用电器、机械摩擦以及各种撞击的结构重要度最大，其重要性在系统中占据首位。其次是风筒漏风、多余横通道未及时封闭、横通道未设置两道

风门、没有按时检查、报警断电仪失灵、报警断电仪位置不当、隧道内电焊气焊、隧道内吸烟、煤自然、电器失爆、静电、带电检修。再次是瓦斯突出、石门揭开煤层、掌子面通过地质构造带、未进行瓦斯抽排等。因此，依据结构重要度排序，再根据客观实际，就可以制定出一套有效预防隧道瓦斯爆炸事故发生的措施。

### 4 预防隧道瓦斯爆炸事故的措施

通过事故树分析，可以得出隧道瓦斯爆炸事故的危险源共有 39 个，导致隧道瓦斯爆炸事故的途径共有 380 个，预防隧道瓦斯爆炸事故发生的途径共有 2 个。隧道瓦斯爆炸事故的影响因素繁多，发生途径也很多，而控制隧道瓦斯爆炸事故只能从控制引爆火源和防止瓦斯积聚两个方面入手。引爆火源共有 19 个基本事件，瓦斯积聚共有 20 个基本事件，考虑到结构重要度以及隧道内的实际情况，应该把防止瓦斯积聚放在制定预防措施的首位，但控制引爆火源也不能松懈，同时瓦斯隧道安全施工管理是防治瓦斯爆炸事故的基础，如图 4 所示。

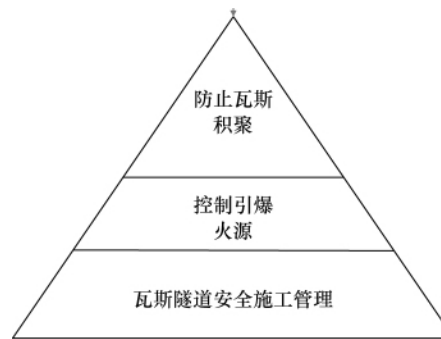


图4 预防瓦斯隧道瓦斯爆炸事故措施层次图

Fig. 4 Level chart of measures to prevent the gas tunnel gas explosion

参考当前中国颁布的《铁路瓦斯隧道技术规范》<sup>[8]</sup>、《煤矿安全规程》<sup>[9]</sup>和《防治煤与瓦斯突出规定》<sup>[10]</sup>等，制定隧道瓦斯爆炸事故预防控制的对策矩阵，如表 3 所示。

表3 瓦斯隧道瓦斯爆炸事故预防对策矩阵

Table 3 Countermeasure matrix to prevent gas tunnel gas explosion

预防单元	预防措施
严格防范出现 引爆火源	施工单位要对机械设备进行严格的检查，并且制定相应的检查制度
	电缆采用铜芯和不延燃橡胶套，监测设备的电缆采用防屏蔽橡胶套
	采用湿式钻孔
	采用煤矿许用炸药，突出地段不得低于三级的煤矿许用的含水炸药
	隧道内高瓦斯工区和瓦斯突出工区的电气设备和作业机械必须使用防爆型。低瓦斯隧道内固定照明设备和监测设备必须采用防爆型，其他设备可以根据实际情况选用非防爆型
	容易碰到的、裸露的电器设备及其电动机外露的传动和转动部分，都必须加装护罩或遮栏
	隧道洞口处装设避雷设备
	瓦斯工区内的配电变压器严禁中性点直接接地
	高瓦斯工区及瓦斯突出工区，不应进行电焊、气焊、喷灯焊接、切割

表 3 瓦斯隧道瓦斯爆炸事故预防对策矩阵(续)  
Table 3 Countermeasure matrix to prevent gas tunnel gas explosion (continued)

预防单元	预防措施
加强瓦斯隧道施工安全管理	加强“安全第一、预防为主、综合治理”的安全价值观
	提高施工人员的安全意识和安全能力
	在前期设计阶段对通风系统进行合理设计和反复实验,避免通风不足和风速过低 开工前必须对施工作业及管理人员进行安全培训,特种作业人员必须持证上岗 进入瓦斯隧道内人员必须穿着棉质工作服防止产生静电
防止瓦斯积聚现象的发生	施工单位在保证足够的通风量和风速的同时,要对隧道内瓦斯含量进行实时监控并且准确、无误地报警 强化局部通风和通风管理,使瓦斯浓度控制在《铁路瓦斯隧道技术规范》规定范围内 在前期隧道探测阶段和掌子面超前钻探时,要对前方的地质状况和瓦斯含量进行合理的预判,对隧道进行合理的等级划分和工区划分,为防止瓦斯突出,制定正确施工方案提供依据 <sup>[11]</sup> 隧道施工前,要探明隧道瓦斯来源、煤层特性指标 各隧道开挖工作面必须采取独立通风 瓦斯易于积聚的空间(如隧道掌子面或通风巷道上隅角、停风巷道、隧道的顶部空间等)和衬砌模板台车附近区域,可采用空气引射器、气动风机等设备 除用作回风的横通道外,其他不用横通道应及时封闭。留作运输用的横通道应设置两道风门 瓦斯工区内,必须有一套同等性能的备用风机 隧道内瓦斯浓度限值及超限处理措施要符合标准 对于瓦斯易于积聚且风流不易达到的地方要随时监测瓦斯浓度 瓦斯隧道在施工期间,必须连续通风。检修、停电等原因导致停风必须撤离人员,停止供电

### 5 工程实例分析

本文以董家山隧道为例,分析瓦斯隧道爆炸的原因及瓦斯爆炸事故后的隧道施工方案、管理以及技术改进措施。

#### 5.1 董家山隧道瓦斯爆炸事故原因分析

董家山隧道“12·22 特别重大瓦斯爆炸事故”调查认定,事故原因是瓦斯异常涌出和电线短路。通过文献[12]了解到,在隧道开工前,超前地质预报结果定义董家山隧道为低瓦斯隧道,可是董家山隧道穿越的煤系地层、断层、褶皱十分发育,地质条件极其复杂,瓦斯绝对涌出量符合高瓦斯隧道要求。而且,在事故前期,隧道内也多次发生过瓦斯燃烧事故,

隧道掌子面瓦斯浓度监测值高达 18%,这些问题都没有得到施工单位的重视,还是按照原定施工方案进行施工。

#### 5.2 董家山隧道瓦斯爆炸事故树分析

通过以上瓦斯爆炸事故原因分析,可以得出,导致此次瓦斯爆炸事故主要原因是, $X_{38}$ : 使用非矿用电器设备; $X_{16}$ : 电缆受损; $X_{17}$ : 变压器开关短路; $X_6$ : 机械火花; $X_7$ : 各种撞击; $X_{22}$ : 瓦斯管理缺陷; $X_{19}$ : 瓦斯突出; $X_{21}$ : 掌子面通过地质构造带; $X_{33}$ : 通风设施不完善; $X_{34}$ : 通风量不够,风速不足; $X_{39}$ : 没有进行瓦斯抽排。据此构建董家山隧道瓦斯爆炸事故树(图 5)。

化简事故树图 5 可以得到,导致瓦斯爆炸事故有 20 个

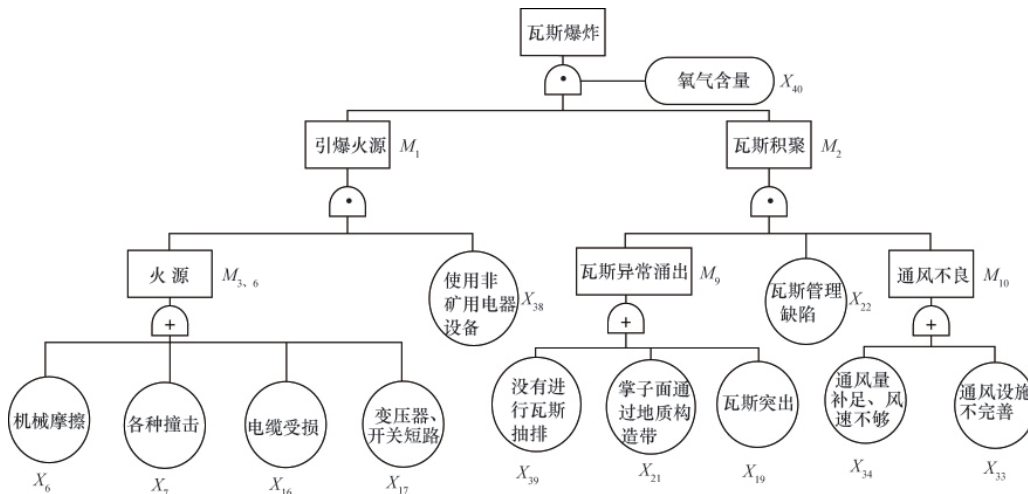


图 5 董家山隧道瓦斯爆炸事故树

Fig. 5 FTA of Dongjiashan's tunnel gas explosion

最小割集, 分别是:  $\{X_6, X_{39}, X_{40}, X_{38}, X_{33}, X_{22}\}$ ,  $\{X_6, X_{39}, X_{40}, X_{38}, X_{34}, X_{22}\}$ ,  $\{X_6, X_{21}, X_{40}, X_{38}, X_{34}, X_{22}\}$ ,  $\dots$ ,  $\{X_{17}, X_{19}, X_{40}, X_{38}, X_{33}, X_{22}\}$ ,  $\{X_7, X_{21}, X_{40}, X_{38}, X_{33}, X_{22}\}$ ,  $\{X_7, X_{19}, X_{40}, X_{38}, X_{33}, X_{22}\}$ ; 得出最小径集为, 径集 1:  $\{X_6, X_7, X_{16}, X_{17}\}$ , 径集 2:  $\{X_{39}, X_{21}, X_{19}\}$ , 径集 3:  $\{X_{38}\}$ , 径集 4:  $\{X_{33}, X_{34}\}$ , 径集 5:  $\{X_{22}\}$ , 径集 6:  $\{X_{40}\}$ ; 结构重要度排序为:  $I(40)=I(38)=I(22)>I(34)>I(33)=I(19)>I(6)=I(21)=I(39)=I(7)>I(16)=I(17)$ 。

虽然董家山隧道瓦斯爆炸事故调查认定的事故原因是瓦斯异常涌出和电线短路, 但是通过事故树分析董家山瓦斯爆炸事故可以看出, 施工单位没有重视隧道瓦斯管理, 从而引发瓦斯管理缺陷、电气管理缺陷潜在危险, 而这些危险是引起此次瓦斯爆炸事故的重要因素。

### 5.3 董家山瓦斯爆炸事故后施工方案

通过事故树分析, 找出了董家山隧道引起瓦斯爆炸事故的隐患和薄弱环节, 需加以改进。具体的改进措施为: 对隧道重新进行超前地质预报, 将董家山隧道定义为“高瓦斯隧道”; 开展瓦斯施工安全教育培训; 对洞内的施工机械、电气以及电缆进行防爆改装; 调整通风标准和瓦斯监控措施, 改善应急预案; 改进超前钻探技术, 及时对瓦斯进行排放; 加强对隧道内瓦斯的管理, 提高整个施工单位的安全素质。

通过施工方案的改进, 董家山隧道 2006 年继续投入建设, 并在 2009 年全线贯通, 未发生一起人员伤亡事故。事实证明, 在建设瓦斯隧道时, 施工单位要在加强瓦斯隧道施工安全管理的基础上, 做到对瓦斯隧道准确的定义, 并且具备合理的通风方案、瓦斯管理方案和电器管理方案, 并认真履行。

## 6 结论

通过利用 FTA 对瓦斯隧道在建期瓦斯爆炸事故进行分析, 结合中国防治瓦斯的相关规范, 制定预防隧道瓦斯事故的措施, 可以得出以下结论。

(1) 在隧道建设中, 瓦斯爆炸事故是小概率事件, 其比例远远小于隧道水灾、火灾、冻灾、衬砌裂损等灾害, 但其所造成的损失却远远大于其他灾害。

(2) 分析隧道瓦斯爆炸事故的危险源发现, 因管理缺陷和设计不合理导致的危险源较多, 其次是机械故障和通风不足, 最少的是不可避免的自然因素。所以施工单位一定要加强安全管理, 提高整个施工单位的安全文化水平。

(3) 通过分析事故树最小割集, 得出导致隧道瓦斯爆炸事故的途径共有 380 种, 如果不加强安全控制, 隧道内是很容易发生爆炸事故的。通过结构重要度计算并结合隧道内的实际情况, 得出施工单位应当把防止瓦斯积聚放在制定防止隧道瓦斯爆炸事故措施的首位, 控制引爆火源其次, 以加强安全施工管理为基础。

### 参考文献 (References)

- [1] 姜洪亮. 紫坪铺隧道瓦斯灾害研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.  
Jiang Hongliang. Research on gas disaster of Zipingpu tunnel [D].

Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010.

- [2] 姜德义, 刘春, 张广洋, 等. 公路隧道全断面揭煤防突技术 [J]. 岩土力学, 2005, 26(6): 906-909.  
Jiang Deyi, Liu Chun, Zhang Guangyang, et al. Rock and Mechanics, 2005, 26(6): 906-909.
- [3] 徐志胜. 安全系统工程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 98-99.  
Xu Zhisheng. Safety system engineering[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2009: 98-99.
- [4] 王爽英, 吴超, 左红艳, 等. 中小型煤矿生产安全模糊层次分析评价模型及其应用[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2010, 41(5): 1918-1922.  
Wang Shuangying, Wu Chao, Zuo Hongyan, et al. Journal of Central South University: Natural Science Edition, 2010, 41(5): 1918-1922.
- [5] 康小兵. 隧道工程瓦斯灾害危险性评价体系研究 [D]. 成都: 成都理工大学, 2009.  
Kang Xiaobing. Study on gas disaster risk assessment system of tunnel engineering[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2009.
- [6] 邓加亮. 公路瓦斯隧道施工风险分析[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2010.  
Deng Jialiang. Risk analysis of highway gas tunnel construction [D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2010.
- [7] 安永林, 黄戡, 彭立敏, 等. 隧道施工风险人-机-环境系统综合评估[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43(1): 301-307.  
An Yonglin, Huang Kan, Peng Limin, et al. Journal of Central South University: Natural Science Edition, 2012, 43(1): 301-307.
- [8] 中华人民共和国铁道部. TB10120—2002 铁路瓦斯隧道技术规范[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2002.  
The Ministry of Railways of the People's Republic of China. TB10120—2002 Railway gas tunnel technical specifications [S]. Beijing: China Railway Press, 2002.
- [9] 国家煤炭安全监察局. 煤矿安全规程 [S]. 北京: 煤炭工业出版社, 2001.  
Supervisory Bureau of National Coal. Regulations in colliery safety [S]. Beijing: Coal Industry Press, 2001.
- [10] 国家煤炭安全监察局. 防治煤与瓦斯突出规定[S]. 北京: 煤炭工业出版社, 2001.  
Supervisory Bureau of National Coal. Control of coal and gas outburst regulations [S]. Beijing: Coal Industry Press, 2009.
- [11] 康小兵, 许模, 丁睿, 等. 隧道瓦斯灾害危险性评价初探[J]. 铁道工程学报, 2010(5): 39-42.  
Kang Xiaobing, Xu Mo, Ding Rui, et al. Journal of Railway Engineering Society, 2010(5): 39-42.
- [12] 谢衍光, 许志忠, 张博. 都汶公路高瓦斯隧道作业机械配置及防爆改装技术[J]. 现代隧道技术, 2009, 46(5): 76-81.  
Xie Xianguang, Xu Zhizhong, Zhang Bo. Modern Tunneling Technology, 2009, 46(5): 76-81.

(责任编辑 马宇红, 代丽)

### 《科技导报》征集“封面文章”

为快速反映我国最新科技研究成果,《科技导报》拟利用刊物最显著位置——封面将最新科研成果第一时间予以突出报道。来稿要求: 研究成果具创新性或新颖性; 反映该领域我国乃至世界前沿研究水平; 可以图片形式予以反映, 图片美观、清晰、分辨率超过 300dpi; 文章篇幅不限, 要说明研究的背景、方法、取得的结果, 以及结论。在线投稿: [www.kjdb.org](http://www.kjdb.org)。