

# 公路隧道火灾起因及预防研究<sup>\*</sup>

杨高尚, 彭立敏, 安永林

(中南大学 土木建筑学院, 湖南 长沙 410075)

**摘要:** 在总结分析近30年典型大中型公路隧道火灾案例基础上, 给出了大中型隧道火灾主要起因统计, 根据隧道火灾起因和故障树(FTA)分析原理, 建立了隧道火灾起因故障树, 通过计算故障树各基本事件发生的概率, 计算出各基本事件关键重要度并进行排序, 找出了导致隧道火灾的常见高频原因, 并提出了防范隧道火灾的措施。

**关键词:** 隧道火灾; 火灾起因; 故障树分析; 高频原因; 预防措施

**中图分类号:** U459.2; U492.8<sup>+3</sup> **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-811X(2008)03-0085-06

随着国民经济的发展, 公路日益延伸, 公路隧道也随之增加。据统计资料显示, 隧道火灾事故随着高速公路的延伸而增多, 其机率随着隧道长度和通行车辆的增加而增加。我国高速公路近期统计的事故率为1.85次~4.64次/100万车km, 火灾事故率为0.04次/100万车km。然而国内缺乏公路隧道火灾这方面的具体统计数据, 因此对公路隧道火灾进行调查、统计及概率分析, 并运用故障树分析原理总结火灾事故的起因, 有助于公路隧道火灾的预防, 保障人民生命财产安全。

## 1 近年典型公路隧道火灾起因统计

日本在1986年进行的统计分析结果为: 高速公路隧道内的火灾事故比率为每1亿车km发生0.5起。德国对联邦高速公路的易北河隧道初期运营情况进行的统计表明: 隧道中平均每月发生一次车辆起火事故。

预防火灾应从分析火灾的起因开始。调查近30年来19条国内外典型火灾事故隧道发生的23起大中型火灾案例, 统计火灾起因如表1<sup>[1-3]</sup>。

表1显示, 隧道的火灾危险和火灾原因主要为车辆上的行李与危险货物, 车辆本身故障和隧道设计不合理等。由于隧道建筑结构复杂, 环境相对密闭, 在封闭空间内温度较高, 热量不易消散, 火灾扑救相当困难, 往往会造成重大的人员伤亡

和财产损失, 因此, 对隧道的火灾起因的分析及预防应该引起足够重视。

### 1.1 公路隧道火灾起因的故障树分析模型

故障树分析<sup>[4-6]</sup>的主要任务之一是寻找导致系统故障的全部故障模式, 其中发生概率最大的故障模式就是系统的薄弱环节。找出了这种故障模式就可指导人们采取措施去加强薄弱环节, 即减小这种故障模式的发生概率, 从而提高系统可靠性。

### 1.2 故障树分析的基本方法

#### (1) 系统故障树结构函数

考虑一个由 $r$ 个部件组成的系统 $S$ , 称系统故障为故障树的顶事件, 记作 $T$ , 称各部件故障为底事件, 记作 $e_i$ , 系统和部件均只能取正常或故障两种状态, 故可用1, 0变量 $x_i$ , 来描述底事件 $e_i$ , 的状态,  $i=1, \dots, r$ 。即

$$x_i = \begin{cases} 1, & \text{当底事 } e_i \text{ 发生时;} \\ 0, & \text{当底事件 } e_i \text{ 不发生时。} \end{cases}$$

由于顶事件的状态是底事件状态的函数, 如果用 $\Psi(X) = \Psi(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 描述顶事件 $T$ 的状态, 则有

$$\Psi(X) = \begin{cases} 1, & \text{当底事 } T \text{ 发生时;} \\ 0, & \text{当底事件 } T \text{ 不发生时。} \end{cases}$$

$\Psi(X)$ 即称为故障树的结构函数或称为系统的故障结构函数。

当系统第 $i$ 个部件的状态从0变到1, 相应系统的状态可能有下列3种变化:

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2007-12-11

基金项目: 西部交通科技建设项目(20033179802)

作者简介: 杨高尚(1969-), 女, 湖南长沙人, 博士, 高级工程师, 主要从事隧道及地下工程防灾研究。

表 1 近年典型公路隧道火灾起因调查表

序号	时间	隧道简介	火灾起因
1	1976 -03	上海打浦路隧道长 2 764 m	大客油箱与地面钢筋相撞起火
2	1977	黄浦江第一条越江隧道	满载乘客的公共汽车车身起火
3	1979 -07	日本坂公路隧道长 2 045 m	4 辆卡车与 2 辆轿车追尾起火
4	1981 -10	日本福静敦贺隧道	载重卡车油箱着火
5	1991 -04/1994 -08/1998 -05	延安东路隧道长 2 261 m	车辆电器线路/发动机故障
6	1993 -06	茵家川隧道火灾	车辆电器线路故障
7	1998 -03/08	上海打浦路隧道，经整改	车辆撞车油管断裂起火/车辆电路故障
8	1998 -07	福建盘陀山第二公路隧道	货车在隧道内起火
9	1999 -03	法意 Montblance 隧道 11 600 m	载重汽车起火
10	1999 -05	奥地利 Tauern 隧道长 6 401 m	撞车起火
11	1999 -06	桃花岭隧道	4 t 聚乙烯树脂的货车
12	1999 -09	浙江甬台温高速公路湖雾岭隧道长 4 115 m	9 t 苯乙烯的槽车撞到隧道壁上
13	1999 -06	浙江大溪岭 4 100 m 隧道	车辆起火
14	2000 -05	意大利都灵至巴多内基亚公路隧道长 4 000 m	装载甜菜的货车起火
15	2001 -10	瑞士 St. Gotthard 长 16 918 m	2 卡车相撞，爆炸起火
16	2002 -01 ~08	楚大高速公路隧道	3 起火灾。一起为车与隧道壁相撞
17	2002 -12	台州猫狸岭隧道长 3 590 m	装易燃物的货车发动机起火
18	2003 -06	韩国首尔高速公路隧道	一辆公共汽车与一辆吉普相撞起火
19	2004 -01	金衢高速常山段樊村隧道	货车轮胎起火
20	2004 -08	渝黔高速真武山隧道	一辆货车突然着火
21	2005 -05	杭金衢高速诸暨新岭隧道	槽罐车左前轮发生爆裂

- ①  $\Psi(0_i, x) = 0 \rightarrow \Psi(1_i, x) = 1;$   
 $\Psi(1_i, x) - \Psi(0_i, x) = 1。$
- ②  $\Psi(0_i, x) = 0 \rightarrow \Psi(1_i, x) = 0;$   
 $\Psi(1_i, x) - \Psi(0_i, x) = 0。$
- ③  $\Psi(0_i, x) = 1 \rightarrow \Psi(1_i, x) = 1;$   
 $\Psi(1_i, x) - \Psi(0_i, x) = 0。$

(2) 概率重要度  $I_i^{Pr}(t)$

由结构函数的分解公式得：

$$\Psi(X) = x_i \Psi(1_i, X) + (1 - x_i) \Psi(0_i, X)。$$

对上式两边取数学期望，因  $X_i$  和  $\Psi(1_i, X)$ ，  
( $1 - X_i$ ) 和  $\Psi(0_i, X)$  相互独立，由数学期望的性  
质得： $E[\Psi(X)] = E(x_i) \cdot E[\Psi(1_i, X)] + (1 -$   
 $E(x_i)) \cdot E[\Psi(0_i, X)]。$

令  $E(x_i) = F_i$  则：

$$E[\Psi(X)] = F_i \cdot E[\Psi(1_i, X)] + (1 - F_i) \cdot E[\Psi(0_i, X)]， \tag{1}$$

其中， $F_i = Ex_i = 1 \cdot P_r(x_i = 1) + 0 \cdot P_r(x_i =$   
 $0) = P_r(x_i = 1)；$

$$E[\Psi(X)] = 1 \cdot P_r(\Psi(X) = 1) + 0 \cdot P_r(\Psi(X) =$$
  
 $0) P_r(\Psi(X) = 1)。$

设  $E(\Psi(X)) = g(F(t))$ ， $F(t) = (F_1(t)，$   
 $F_2(t)，\cdots，F_n(t))$ ，

则： $g(F(t)) = F_i g(1, F(t)) + (1 - F_i) g(0, F(t))。$

两边取偏导数得：

$$\frac{\partial g(F(t))}{\partial F_i} = g(1_i, F(t)) - g(0_i, F(t))。$$

定义概率重要度为：

$$I_i^{Pr}(t) = \frac{\partial g(F(t))}{\partial F_i(t)} = g(1_i, F(t)) - g(0_i, F(t))。 \tag{4}$$

部件  $i$  概率重要度  $I_i^{Pr}(t)$  的数学定义可以解  
释为： $i$  部件状态取 1 值时顶事件概率和  $i$  部件状  
态取 0 值时顶事件概率值的差。其物理意义为：  
系统处于当且仅当部件  $i$  失效系统即失效状态的  
概率。

(3) 关键重要度  $I_i^{Cr}$

定义关键重要度为：

$$I_i^{Cr}(t) \equiv \lim_{\Delta Q_i(t) \rightarrow 0} \frac{\frac{\Delta g(F(t))}{g(F(t))}}{\frac{\Delta F_i(t)}{F_i(t)}} = \frac{F_i(t)}{g_i(t)} \cdot \frac{\partial g(F(t))}{\partial F_i(t)} = \frac{F_i(t)}{g(t)} I_i^{Pr}(t)。(5)$$

关键重要度是一个变化率的比,是*i*事件发生概率的变化率所引起的隧道火灾概率的变化率。在关键重要度的表达式中,1/*g*对所有事件都相同,不同者为 $F_i I_i^{Pr}$ 。 $I_i^{Pr}$ 是隧道处于*i*事件为关键事件的临界状态的概率, $F_i$ 是*i*事件发生的概率,那么 $F_i I_i^{Pr}$ 就是*i*事件触发隧道火灾的概率。 $F_i I_i^{Pr}$ 愈大表明由*i*事件触发隧道火灾的可能性就愈大,因此,一旦隧道发生火灾,应首先怀疑是关键重要度最大的事件触发了这次隧道火灾,按关键重要度大小顺序,列出隧道火灾起因事件诊断检查顺序表,可用来指导隧道火灾预防及营运维护<sup>[7-10]</sup>。

### 1.3 公路隧道火灾起因故障树的建立

根据近年公路水路交通行业发展统计公报<sup>[11]</sup>统计,截止到2005年,我国隧道共2 889座,总长为1 527 km。由表2统计的近年我国大中型公路隧道火灾事故次数,可以计算出近年我国大中型公路隧道火灾事故发生的概率。从表2中数据计算

可得,平均每年大中型隧道火灾事故发生概率的总体平均数为: $\bar{P} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} P_i = 0.002\ 015$ ,平均每年大中型隧道火灾事故发生概率的总体方差为 $\sigma^2 = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} (P_i - \bar{P})^2 = 4.654 \times 10^{-7}$ 说明每年大中型事故发生的概率变化不大,总体平均数具有统计代表性。分析火灾的起因,建立公路隧道火灾起因故障树<sup>[4-6]</sup>(图1)。

### 1.4 起因故障树各事件参数及重要度分析

设火灾发生事件为*A*,火灾发生时由基本事件 $k_i$ 引起的概率为 $P(k_i/A)$ , $P(k_i/A)$ =事件发生的次数/*n*,*n*=17,则火灾发生且由基本事件 $k_i$ 引起的概率为:

$$P_{ki} = P(Ak_i) = P(A)P(k_i/A)。(6)$$

隧道火灾起因故障树结构函数的表达式为:

$$\Psi = k_2 + k_3 + \cdots + k_{15}, \text{ 其中 } k_2, \cdots, k_{15} \text{ 之间相互独立, 该故障树顶事件发生的概率为:}$$

$F = 1 - \prod_{i=2}^{15} (1 - F_{ki})$ ,其中 $F_{ki} = P_{ki}$ ,即 $F = 1 - \prod_{i=2}^{15} (1 - P_{ki}) = 0.002\ 013$

(1) 各基本事件概率重要度

表 2

近年我国大中型公路隧道火灾发生概率

年份	隧道长 km	隧道 座数	火灾 座数	火灾发 生年概率	火灾原因	估计经济损失
1976	36	368	1	$2.717 \times 10^{-3}$	大客车油箱与地面钢筋相撞漏油起火	死5伤2
1977	41	374	1	$2.673 \times 10^{-3}$	满载的公共汽车车身起火	死32
1991	122	673	1	$1.485 \times 10^{-3}$	车辆电器线路故障	50多万元
1993	136	682	1	$1.466 \times 10^{-3}$	车辆电器线路故障	死8伤10, 561万元
1994	158	687	1	$1.455 \times 10^{-3}$	车辆发动机故障	60万元
1998	321	705	3	$4.255 \times 10^{-3}$	车辆电器线路/发动机故障/车辆追尾	210多万元
1999	442	711	2	$2.813 \times 10^{-3}$	4t 聚乙烯树脂的货车/9t 苯乙烯的槽车撞到隧道壁上	120多万元
2002	835	1 782	4	$2.244 \times 10^{-3}$	装易燃物的货车发动机起火/货车轮胎起火/车辆相撞	380多万元
2004	1 245	2 879	2	$6.946 \times 10^{-4}$	一辆货车油箱着火	70多万元
2005	1 527	2 889	1	$3.461 \times 10^{-4}$	槽罐车左前轮发生爆裂	40多万元

由公式(4)得隧道火灾起因故障树各基本事件的概率重要度为:

$$I_{ki}^{Pr} = \frac{\partial F}{\partial P_{ki}} = \frac{\partial F}{\partial P_{ki}} = \prod_{j=2, j \neq i}^{15} (1 - P_{kj}) = \frac{1 - F}{1 - P_{ki}}, \quad i = 2, \cdots, 15。(7)$$

(2) 各基本事件关键重要度

由公式(5)得隧道火灾起因故障树各基本事件的关键重要度为:

$$I_{ki}^{Cr} = \frac{F_{ki}}{F} I_{ki}^{Pr} = \frac{P_{ki}}{F} I_{ki}^{Pr}, \quad i = 2, \cdots, 15。(8)$$

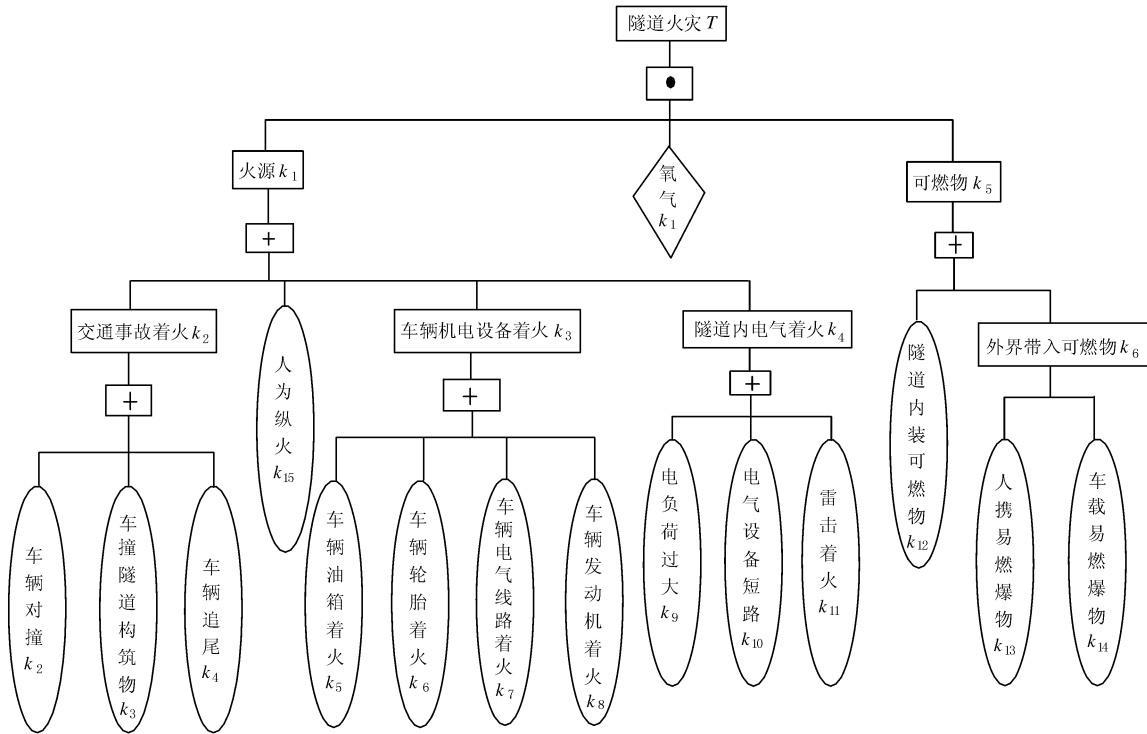


图1 公路隧道火灾起因故障树

由公式(6)~(8)可以求出外因起火故障树各基本事件参数及重要度(表3)。

表3 公路隧道火灾起因故障树各基本事件参数及重要度

基本事件	概率 $P_{ki}$	概率重要度	关键重要度	按关键重要度排序
车辆对撞 $k_2$	$1.185\ 45 \times 10^{-4}$	0.998 104 834	$5.876\ 405\ 8 \times 10^{-2}$	3
车撞隧道构筑物 $k_3$	$1.185\ 45 \times 10^{-4}$	0.998 104 834	$5.876\ 405\ 8 \times 10^{-2}$	3
车辆追尾 $k_4$	$1.185\ 45 \times 10^{-4}$	0.998 104 834	$5.876\ 405\ 8 \times 10^{-2}$	3
车辆油箱着火 $k_5$	$2.370\ 91 \times 10^{-4}$	0.998 223 183	$1.175\ 422\ 2 \times 10^{-1}$	2
车辆轮胎着火 $k_6$	$2.370\ 91 \times 10^{-4}$	0.998 223 183	$1.175\ 422\ 2 \times 10^{-1}$	2
车辆电气线路着火 $k_7$	$3.556\ 36 \times 10^{-4}$	0.998 341 559	$1.763\ 399\ 1 \times 10^{-1}$	1
车辆发动机着火 $k_8$	$3.556\ 36 \times 10^{-4}$	0.998 341 559	$1.763\ 399\ 1 \times 10^{-1}$	1
电负荷过大 $k_9$	0	0.997 986 513	0	4
电气设备短路 $k_{10}$	0	0.997 986 513	0	4
雷击着火 $k_{11}$	0	0.997 986 513	0	4
隧道内装可燃物 $k_{12}$	0	0.997 986 513	0	4
人携易燃易爆物 $k_{13}$	$1.185\ 45 \times 10^{-4}$	0.998 104 834	$5.876\ 405\ 8 \times 10^{-2}$	3
车载易燃易爆物 $k_{14}$	$2.370\ 91 \times 10^{-4}$	0.998 223 183	$1.175\ 422\ 2 \times 10^{-1}$	2
人为纵火 $k_{15}$	$1.185\ 45 \times 10^{-4}$	0.998 104 834	$5.876\ 405\ 8 \times 10^{-2}$	3

1.5 公路隧道火灾起因故障树分析结果

由表3知,  $k_7$ 、 $k_8$ 事件即车辆电气线路着火、车辆发动机着火,触发隧道火灾的可能性最大,其关键重要度均为0.176 339 91,以下依次排序为:

- (1) 关键重要度为0.175 422 2的事件  
 $k_5$ 事件——车辆油箱着火;

- $k_6$ 事件——车辆轮胎着火;  
 $k_{14}$ 事件——车载易燃易爆物。  
(2) 关键重要度为0.058 764 058的事件  
 $k_2$ 事件——车辆对撞;  
 $k_3$ 事件——车撞隧道构筑物;  
 $k_{13}$ ——人携易燃易爆物;  
 $k_{15}$ ——人为纵火。

- $k_4$  事件——车辆追尾;
- (3) 关键重要度为 0 的事件
- $k_9$  事件——电负荷过;
- $k_{10}$  事件——电气设备短路;
- $k_{11}$  事件——雷击着;
- $k_{12}$  事件——隧道内装可燃物。

### 1.6 公路隧道火灾起因的预防重点

由上述故障树分析可知, 公路隧道大中型火灾事故的预防重点依次为:  $k_7$  事件、 $k_8$  事件、 $k_5$  事件、 $k_6$  事件、 $k_{14}$  事件、 $k_2$  事件、 $k_3$  事件、 $k_4$  事件、 $k_{13}$  事件、 $k_{15}$  事件等等。

## 2 隧道火灾预防措施

从以上隧道火灾事故产生的原因分析来看, 隧道安全在很大程度上取决于道路使用者的行为和途中车辆的状况以及隧道设施。针对以上事项, 可从行驶车辆和司乘人员及隧道设施 3 个方面提出如下隧道火灾预防措施<sup>[7,12-14]</sup>:

### 2.1 行驶车辆

统计表明, 货车比小汽车更容易引起火灾。必须加强对货车火灾的防范措施, 特别是装载易燃易爆物的货车火灾, 且装载一般可燃物的货车火灾次数也较频繁, 故扑灭装载可燃物的货车火灾是消防设计的重点之一。该类火灾起因大多为汽车装载物起火、汽车相撞起火, 其中汽车相撞导致油箱汽油起火更应引起重视。

由于我国车辆型号较多, 车况参差不齐、车辆超重超高现象也非常严重, 导致许多隧道事故都是由于车辆本身原因引起的, 根据国内外的经验提出如下车辆火灾预防措施。

#### (1) 技术检查

所有车辆(尤其是重型货车、公交车、巴士)应定期进行技术检查(应重点检查电气线路、发动机、轮胎等), 及时查出车辆的技术缺陷, 对于超年限的车辆及易破坏隧道设施的超重超高车辆应禁止在隧道内通行, 避免车辆发生交通事故引发火灾。

#### (2) 油箱的抗火能力及携带燃料的数量

继续研究油箱的抗火、抗压能力, 减少隧道事故中由于车辆油箱爆炸、燃烧引起的事故扩大。另外, 车辆(尤其指重型车辆)应根据其行驶路程的远近添加适量燃料。

#### (3) 车辆内易燃材料的使用及携带

车辆应尽量使用新型抗火、无毒材料来代替

车辆内的易燃材料。此外, 对于装载易燃易爆物的车辆可依具体情况规定夜晚定点通行, 或由专用消防车引导其通行。

#### (4) 灭火设备的配备

根据国家相关规定, 所有车辆都应该配备灭火设备, 特别是卡车、巴士、运输危险货物的车辆。

### 2.2 隧道设施

#### (1) 隧道构筑物

隧道内的紧急停车带、疏散通道等与主线连接部应形成平缓过渡曲线, 或在这些地方设置弹性防撞设施, 或全程设置内护栏, 以避免车辆撞击隧道构筑物引起火灾。

#### (2) 安全标志牌

隧道全程应设置隧道安全提示信息标志牌, 包括禁止超车、限制车速、车距等, 以免车辆追尾、相撞事故引发火灾。

### 2.3 司乘人员

#### (1) 司机

加强司机在隧道安全方面的培训, 用教育、法规、警察管理和处罚约束司机在限制的行车速度和行车间距内驾驶。此外, 使其了解紧急情况下的行车处置, 以免慌张不知所措。当隧道内发生事故时, 应尽量将车辆停靠在紧急停车带处或停靠在行车道的右侧, 并作好停车路标。

#### (2) 乘客

加强乘客在隧道消防安全方面的教育, 严禁携带易燃易爆物上车, 避免人为纵火。另外, 当车辆发生事故时下车等待, 以免火灾造成的人员伤亡。

## 3 结论

根据近 30 年典型大中型公路隧道火灾案例主要成因统计, 通过隧道火灾起因和隧道火灾故障树分析, 计算故障树各基本事件发生的概率及各基本事件重要度并进行排序, 可以找出导致隧道火灾的高频起因, 即车撞隧道构筑物、发动机着火触发隧道火灾的可能性最大; 其次是轮胎、车辆油箱; 再次是车辆相撞、追尾、车载易燃易爆物、车辆电气线路等。据此, 可从行驶车辆、隧道设施及司乘人员 3 个方面, 提出防范隧道火灾的预防措施。

## 参考文献:

- [1] 杨其新. 国内外隧道消防方法及火灾实例调研报告[R]. 成都: 西南交通大学, 1996.

- [2] Haukur. An Overview of Vehicle Fires in Tunnels [R]. SP Swedish National Testing and Research Institute. 1996.
- [3] 公安部消防局. 中国火灾统计年鉴(1996-2004)[M]. 北京: 中国人民公安大学出版社, 2004.
- [4] Lennart L jung. System identification theory for the user [M]. Bei Jing Tingshua University press, 2002.
- [5] 隋鹏程, 陈宝智. 安全原理与事故预测[M]. 北京, 冶金工业出版社, 1988.
- [6] 闫金花. 大型商业建筑安全防火系统分析[D]. 西安建筑科技大学, 2005.
- [7] 刘伟. 我国公路隧道防救研究[J]. 中国公路, 2005, (2)52-55.
- [8] 陈立道, 王锦, 吴晓宇. 道路隧道火灾预防与控制研究[J]. 地下空间, 2003, 23(1): 72-75.
- [9] 盛刚, 颜静仪. 影响隧道安全的因素及预防措施[R]. 国际隧道研讨会, 2002: 504-511.
- [10] 安永林, 彭立敏, 杨高尚. 特长公路隧道内的横通道间距和车行间距研究[J]. 灾害学, 2007, 22(2): 128-131.
- [11] 闫治国, 朱合华, 何利英. 欧洲隧道防火计划(UPTUN)介绍及启示[J]. 地下空间, 2004, (24): 2.
- [12] 彭立敏, 安永林, 杨高尚. 隧道火灾调研及其对雪峰山隧道防灾设计的启示[J]. 灾害学. 2006, 21(3): 103-106.
- [13] 刘伟, 袁学勘. 欧洲公路隧道营运安全技术的启示[J]. 现代隧道技术, 2001, (38)1: 17.

## Study on Causes of Tunnel Fires and the Prevention

Yang Gaoshang, Peng Limin and An Yonglin

(College of Civil Engineering and Architecture, Central South University, Changsha 410075, China)

**Abstract:** Based on the analysis of fires cases in large and moderate tunnels in recent 30 years, the statistics of causes of fires are presented. According to the tunnel fire causes and fault tree analysis (FTA) theory, the fault tree of causes of fires in large and moderate tunnel is established. By calculating occurrence possibility of every basic event of the fault tree, the critical importance degree of every basic event is calculated and sequenced. So the causes of high frequent tunnel fires are searched out and some preventive measures against tunnel fire are put forwarded.

**Key words:** causes of tunnel fire; fault tree analysis; causes of high frequent fires; preventive measures