

高速公路油罐车燃烧安全分析

于秀珍 牟瑞芳

西南交通大学，交通运输与物流学院，成都 610031

摘要：油罐车道路运输占据了货物运输市场相当大的一部分，在运输过程中危险性强、危害性大，且发生的事故往往是灾难性的事故，极易造成人员伤亡、环境污染和财产损失，甚至影响到社会的稳定。因此，研究油罐车道路运输的安全工作具有重要的现实意义。本文以2006年6月3日1时40分，京珠高速从化棋杆路段上，由于车辆碰撞导致甲醇泄漏，发生燃烧事故为例，运用事故树的方法分析出火源和甲醇泄漏是这次事故发生的主要原因，然后对燃烧危险性进行定量的分析，得出人员避难和消防队员灭火的安全距离，在此基础上得出一些有规律性的结论，为有关危险品道路运输企业的决策提供依据，从而使危险品道路运输企业的事故概率有所降低。

关键词：事故树分析；道路危险货物运输；预防与控制

中图分类号：U491.31

文献标识码：A

文章编号：1672-4747(2013)04-0104-06

DOI:10.3969/j.issn.1672-4747.2013.04.018

Safety Study of Highway Tanker Combustion

YU Xiu-zhen MU Rui-fang

School of Transportation and Logistics,

Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China

Abstract: Tanker road transportation occupies a considerable part of the cargo transport market. There is strong risk, hazards in the transportation, and the transportation accidents are often easy to cause casualties, environmental pollution, damage to property and even affect the social stability. Therefore, study of oil tankers' safety of road transport is of great practical significance. Based on the burning accident due to methanol leaks on the Beijing-Zhuhai Expressway Conghua Qigan sections, on June 3, 2006 at 1:40, applying fault tree analysis, and according to that fire and leakage of methanol are the main causes of the accident, the safe distances for the person and firefighter extinguishing were drawn by a quantitative analysis of the burning danger. On this basis, some regularity conclusion provides a basis for enterprise decisions about dangerous goods road transport, so that reduce the

收稿日期：2012-12-28.

作者简介：于秀珍，(1990-)女，河南周口人，西南交通大学运输与物流硕士研究生学院。

probability of dangerous goods accident on road transport .

Key words : Fault tree analysis , road transport of dangerous goods , prevention and control

0 引言

据不完全统计,我国2008年1月—2010年5月期间共发生485起危险品公路运输事故,事故中死亡人数共151人,受伤或中毒人数共463人。485起事故起因按照由道路交通事故引发的危险品事故、车辆及设备导致的危险品事故、环境因素引发的危险品事故、管理失效导致的危险品事故、人员失误导致的危险品事故五类进行分类统计,事故发生起数分别为303起、69起、38起、20起、33起,另有22起事故原因不详^[1]。可以看出,由于道路交通事故引发的危险品事故占了62%,比例是最大的。

油罐车运输作为道路运输的一种重要方式,由于它有高风险性的特点,很容易发生事故,在给经济带来繁荣的同时,也给社会稳定和经济发展带来了严重的影响。因此,分析研究导致高速公路油罐车事故的主要原因,防止事故的再次发生,是保障交通运输安全、科学发展的基础性工作。

1 影响油罐车道路运输安全性因素的分析

在我国的石油运输中,交通事故率日趋上升,各种油罐火灾事故也时有发生,给人们带来了巨大的经济损失和精神损失。因此,必须对这些事故的特点、危害性以及导致事故的危险因素进行深入的分析研究。

1.1 油罐车事故的特点

1.1.1 事故发生时间具有不确定性

油罐车燃烧爆炸一般都会呈现时间短、爆炸突然且瞬间完成,爆炸的先兆不明显,爆炸和燃烧交叉发展,事故的发生具有不确定性。

1.1.2 事故发生地点具有流动性

油罐车是一种油料运输工具,在油料运输的过程

中,各地的情况和致灾因素也不尽相同,各种不同的情况也给事故的发生带来了不确定性和流动性。

1.1.3 事故发生危害巨大,扑救困难

由于具有良好的流动性,易燃液体一旦从运容器中泄漏出来,极易大面积流淌,当遇到合适的外界环境,如适当的风向、风速、温度等将使火灾迅速蔓延扩大,产生高能量的火灾和高辐射热,使扑救变得困难。另外,在火场中受热的容器有爆炸的危险,人员在吸入大量的有毒有害物质后发生中毒。

1.2 油罐车在运输过程中的危险性分析

危险品货物运输由于装载的是易燃、易爆、毒害性等货物,极易发生起火、泄漏、爆炸等交通事故,是一个“流动的危险源”,每一个驾驶或乘坐危险品车辆的人员,每一个路过危险品车辆的公民,每一个公路附近的家庭都可能成为无辜的受害者,且危险品运输交通事故具有较强的突发性和极高的频发性,事故的后果往往极为严重。

2 高速公路油罐车运输的系统安全分析

2006年6月3日1时40分,京珠高速从化棋杆路段上,一辆装运甲醇(工业酒精)的车辆在与一辆满载木材的平板大货车发生擦碰后导致甲醇泄漏,两车随后剧烈燃烧,并引燃停在路边的一辆压路机,此次事故造成3人死亡,1人受重伤。究其原因主要是易燃液体甲醇本身固有的危险性、储存设施不健全和安全管理不利造成的。本文拟用事故树分析方法,以油罐车燃烧爆炸为顶上事件编制事故树,从易燃液体燃烧机理出发,对此次事故进行分析,找出影响事故发生的基本事件,进而有针对性的提出措施加以预防达到降低事故发生概率的目的。

2.1 京珠高速公路油罐车燃烧原因分析

2.1.1 油罐车火灾发生机理

火灾是在时间和空间上失去控制的燃烧所造成的灾害,火灾发生的条件实质上就是燃烧的条件,可燃物、氧化剂和点火源是构成燃烧的三个要素,这三个要素同时存在并且相互作用,燃烧才能发生^[2]。因此,这三个要素是火灾发生的充分条件,也是最直接的原因。在人们生活和生产中,可燃物和氧化剂(空气)是客观存在的,绝大多数油罐火灾是由火花(明火、静电、雷击及工业电火花)引起罐内油蒸汽和空气的混合爆炸而起火的,这次事故也不例外。装运甲醇(工业酒精)的车辆在与满载木材的平板大货车发生擦碰后导致甲醇泄漏,甲醇在空气中蒸发形成气体,由于车辆的摩擦和撞击产生高温和冲击火花,火花点燃空气中的甲醇蒸汽发生燃烧,火焰加热甲醇的表面使甲醇迅速蒸发,甲醇蒸汽相对密度小因浮力而形成上升气流,上升气流则在油罐内形成局部低压,因而,周围的空气被吸入油罐与甲醇蒸汽混合燃烧形成火舌,随着火势增强,火焰对液体表面的热辐射也增强。液体表面接受了更多的辐射热从而产生更多的甲醇蒸汽,进一步增强了火势和上升气流的速度。

2.1.2 油罐车燃烧原因分析

和其他事故一样,从系统工程的角度出发,本次事故致因由3个因素构成:一是物的因素,即易燃液体本身的组成、结构、稳定性;为安全和作业而使用的货物包装、装卸及运输工具、设施和设备等。二是人的因素,指人的思想、工作态度、技能水平、安全行为等。三是管理因素,包括政策、法规、规章、制度的制定和执行;安全管理机构、机制;安全监督保证等。

根据上述分析,结合道路危险货物运输的特点,分析油罐车发生事故的原因主要存在以下3个方面。

2.1.2.1 物的因素

(1) 甲醇的性质及其危害性

甲醇易燃,具刺激性,燃烧时有无光的淡蓝色火焰。蒸气能与空气形成爆炸混合物,遇明火、高热能引起燃烧爆炸;能在较低处扩散到相当远的地方,遇

明火会引着回燃。有毒,可直接侵害人的肢体细胞组织,特别是侵害视觉神经网膜,致使失明。

(2) 机械作用

装运甲醇(工业酒精)的车辆在与满载木材的平板大货车发生擦碰,导致罐装车里面装的液体从裂口喷涌而出,溅在木材车与压路机上,碰撞产生的局部高热和火花,很快使甲醇和木材开始燃烧。

(3) 运输车辆

车辆超载、超装现象是造成事故的重大隐患。据现场消防人员介绍,木材车由于行驶之前未及时进行设备的检修和零部件的日常检查而出现故障,事发时正停在路边维修。

2.1.2.2 人的因素

人的原因指装木材的货车停车维修时是否停在适当位置并设置了相应的信号,装运甲醇的罐装车到底有没有人为的违规行为。事发高速公路路段正在进行维修,是否设置相应的提醒标志,都是导致事故发生的主要因素。

2.1.2.3 管理因素

通常管理上的危险来自于组织、管理体系不健全、组织者违章指挥、操作人员违章作业、违反劳动纪律等。如驾驶员安全意识不高,对驾驶员、操作人员的安全教育不够(危险、危害估计不足,带病驾驶、疲劳驾驶等);无设备管理制度或不够完善,造成危险品运输车辆检修、检查执行不够严格,造成车辆技术状况不达标、设备失灵,从而造成交通事故;管理决策失误,导致运输车辆、运输路线、运输时间选择错误或选择不合理;对驾驶员、押运员培训不足,导致发生突发事件时,对事故的应急处理不当,造成事故危害的扩大;管理人员强行违章指挥导致危险品的装载错误、包装不合格等引发事故;对危险品货物运输相关法律、法规认识不足,导致非法运输。

2.2 事故树的编制

通过事故案例调查分析得出,引起甲醇罐车燃烧的原因分为2类:即与火源接触和泄露。现以油罐车火灾为顶上事件,逐级分析导致事故发生的各种原因,编制油罐车火灾事故树,如图1所示。

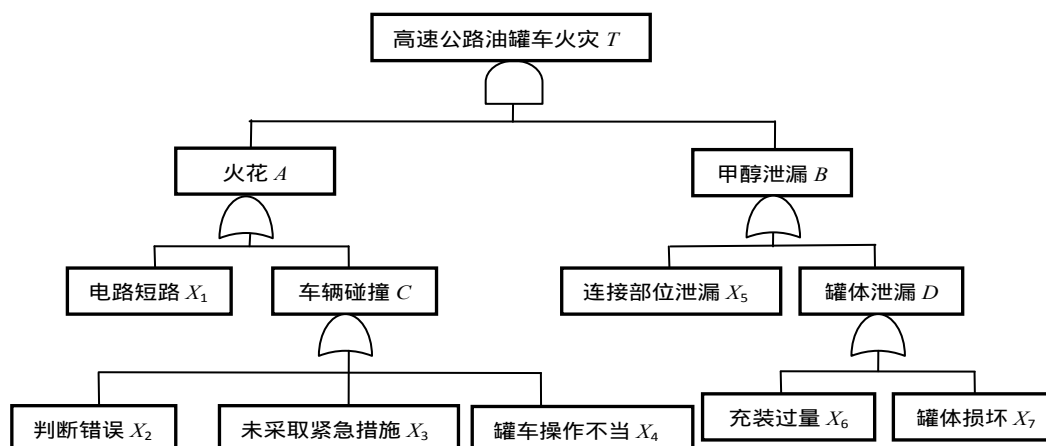


图1 高速公路油罐车火灾事故树

Fig.1 Highway tanker fire fault tree

2.3 油罐车燃烧事故树分析

(1) 求解最小径集

从油罐车燃烧爆炸事故树的结构出发,分析各基本事件(监管要素)对顶事件(危险货物运输安全监管体系)的影响程度,应用安全系统工程理论,列出逻辑关系式,求出最小割集,找出影响危险货物运输安全监管的可能路径^[3]。用布尔代数化简法求解事故树的最小割集:

结构函数式

$$\begin{aligned} T &= A \cdot B = (X_1 + C)(X_5 + D) = (X_1 + X_2 + X_3 + X_4)(X_5 + X_6 + X_7) \\ &= X_1 X_5 + X_1 X_6 + X_1 X_7 + X_2 X_5 + X_2 X_6 + X_2 X_7 \\ &\quad + X_3 X_5 + X_3 X_6 + X_3 X_7 + X_4 X_5 + X_4 X_6 + X_4 X_7 \end{aligned}$$

式中, T ——高速公路油罐车火灾;

A ——火花;

B ——甲醇泄漏;

C ——车辆碰撞;

D ——罐体泄漏;

X_1 ——电路短路;

X_2 ——判断错误;

X_3 ——未采取紧急措施;

X_4 ——罐车操作不当;

X_5 ——连接部位泄漏;

X_6 ——充装过量;

X_7 ——罐体损坏;

因此,该事故树的最小割集为 $K_1 = \{ X_1, X_5 \}$, $K_2 = \{ X_1, X_6 \}$, $K_3 = \{ X_1, X_7 \}$, $K_4 = \{ X_2, X_5 \}$, $K_5 = \{ X_2, X_6 \}$, $K_6 = \{ X_2, X_7 \}$, $K_7 = \{ X_3, X_5 \}$, $K_8 = \{ X_3, X_6 \}$, $K_9 = \{ X_3, X_7 \}$, $K_{10} = \{ X_4, X_5 \}$, $K_{11} = \{ X_4, X_6 \}$, $K_{12} = \{ X_4, X_7 \}$ 。在事故树分析方法中,最小割集用来表征系统的危险程度,每个最小割集都是顶事件发生的一种可能途径,当这些最小割集中的任何一个发生时,顶事件就必然发生。最小割集的数目越多,危险性越大,每个最小割集代表了一种事故模式,根据最小割集集合发现事故树系统中的最薄弱环节,判断出最危险的情况^[4]。

(2) 求解结构重要度

结构重要度反映基本事件在事故树中的重要性,即影响程度。每个最小割集记作 E_r ,则结构重要度的计算公式为

$$I(i) = \frac{1}{k} \sum_{r=1}^k \frac{1}{m_r} (X_i \in E_r) \quad (i=1, 2, 3, \dots, n)$$

式中: $I(i)$ ——基本事件 X_i 的结构重要度;

k ——事故树最小割集的个数;

n ——基本事件的个数;

m_r ——第 r 最小割集 E_r 内包含的基本事件个数

分析 12 个最小割集,可以发现,基本事件 X_5 、 X_6 、 X_7 (甲醇泄漏的各基本事件)其结构重要度较大,其余事件结构重要度相对较小。由此得出的结构重要

度顺序：

$$I(1)=I(2)=I(3)=I(4)<I(5)=I(6)=I(7)$$

2.4 事故树分析结论

由事故树分析可知,火源与甲醇泄漏构成了油罐车燃烧事故发生的要素。构成甲醇泄漏的基本事件的结构重要系数较大,是燃烧事故发生的重要条件,由此可知,液化石油气罐的密封是否良好对防止燃烧事故十分重要。导致车辆碰撞的基本事件结构重要度次之,这就要求我们管理部门加强安全教育,提高驾驶员的操作技能和应急处理能力,可避免事故发生。另外,加强罐区安全管理,防止铁器撞击,防止产生静电火花及罐区内电气设备要符合防火防爆要求等,也是防止燃烧事故发生的必要条件。

2.5 京珠高速公路油罐车燃烧事故危险性定量分析

火灾通过热辐射的方式影响周围环境,热辐射的后果一般用热辐射通量和热辐射强度来衡量,当火灾产生的热辐射强度足够大时,可使周围的物体燃烧或变形,强烈的热辐射可能烧伤或烧死人员,造成财物损失。热辐射造成伤害或损害的情况取决于热辐射强度^[5],表1为不同热辐射通量造成的伤害和损失情况。

表1 不同热辐射通量造成的伤害和损失

Tab.1 Different damage and loss caused by heat radiation flux

热辐射通量/ (kW/m ²)	对设备的损坏	对人的损害
37.5	操作设备全部损坏	1%死亡/10s
25	在无火焰、长时间辐射,木材燃烧的最小能量	重大损伤/10s 100%死亡/1min
12.5	有火焰时,木材燃烧塑料融化的最低能量	一度烧伤/10s 1%死亡/1min
4	-	20s以上感觉疼痛
1.5	-	长期辐射无不舒服

因此,油罐车发生火灾事故,其危害的定量分析包括火焰高度、热辐射通量、热辐射强度等方面。

2.5.1 甲醇燃烧速率

燃烧速度描述油罐火灾猛烈程度的一个特性参数,它表征单位时间内燃烧掉的甲醇数量。

因为甲醇的沸点为 363.15 K,高于环境温度,故

$$m_f = \frac{cH_c}{c_p(T_b - T_e) + H_v}$$

式中, m_f ——液体单位面积燃烧速率, kg/(m²s);

c ——常数, 0.001 kg/(m²s);

H_c ——液体燃烧热, J/kg; 取 20×10^6 J/kg;

H_v ——液体在常压沸点下的蒸发热, J/kg,

取 1.1×10^6 J/kg;

c_p ——液体的比定压热容, J/(kg·K),

取 2516 J/(kg·K);

T_b ——液体的沸点, K, 取 363.15 K;

T_e ——环境温度, K, 取 298.15 K。

则:汽油的燃烧速率

$$m_f = \frac{0.001 \times 20 \times 10^6}{2516 \times (363.15 - 298.15) + 1.1 \times 10^6} = 0.016 \text{ kg/(m}^2\text{s)}$$

2.5.2 池火灾火焰高度

甲醇泄漏后流到地面形成液池,池火模型一般按圆形液面计算,其他形状的液池换算为等面积的圆池。本文将甲醇泄漏形成的液池简化为是半径为 11.3 米的液池。假设当时环境内无风,火焰高度计算公式如下:

$$H = 42D \left[\frac{m_f}{\rho_a \sqrt{gD}} \right]^{0.61}$$

式中, ρ_a ——空气密度, 取 1.29 kg/m³;

g ——重力加速度, 9.8 m/s²;

D ——液池直径, m。

则

$$H = 42 \times 2 \times 11.3 \times \left[\frac{0.016}{1.29 \times \sqrt{9.8 \times 2 \times 11.3}} \right]^{0.61} = 12.56 \text{ (m)}$$

2.5.3 甲醇燃烧时的总热通量

$$q_{\text{总}} = (\pi r^2 + 2\pi rH)m_f \eta H_c / [72(m_f)^{0.61} + 1]$$

式中, $q_{\text{总}}$ ——总热通量, W;

r ——液池半径, m;

η ——效率因子,一般可取 0.35;

H ——火焰高度, m。

则

$$q_{\text{总}} = (11.3^2 + 2 \times 11.3 \times 12.56) \times 3.14 \times 0.016 \times 0.35 \\ \times 20 \times 10^6 / [72(0.016)^{0.61} + 1] \\ = 2.14 \times 10^6 \text{ (W)}$$

2.5.4 热辐射强度为 I 处距中心位置

$$x = \sqrt{\frac{t_c q_{\text{总}}}{4\pi I}}$$

式中, I ——热辐射强度, W/m^2 ;

t_c ——空气导热系数, 没有具体数值时, 可取 1。

死亡区 (热辐射强度 $I > 37.5 \text{ kW}/\text{m}^2$) 半径:

$$R_{\text{死亡}} = \sqrt{\frac{21.4 \times 10^6}{4 \times 3.14 \times 37.5 \times 10^3}} = 6.74 \text{ m}$$

重伤区 (热辐射强度 $I > 25 \text{ kW}/\text{m}^2$) 半径:

$$R_{\text{重伤}} = \sqrt{\frac{21.4 \times 10^6}{4 \times 3.14 \times 25 \times 10^3}} = 8.25 \text{ m}$$

轻伤区 (热辐射强度 $I > 12.5 \text{ kW}/\text{m}^2$) 半径:

$$R_{\text{轻伤}} = \sqrt{\frac{21.4 \times 10^6}{4 \times 3.14 \times 12.5 \times 10^3}} = 11.675 \text{ m}$$

感觉区 (热辐射强度 $I > 4 \text{ kW}/\text{m}^2$) 半径:

$$R_{\text{感觉}} = \sqrt{\frac{21.4 \times 10^6}{4 \times 3.14 \times 4 \times 10^3}} = 20.64 \text{ m}$$

综上所述池火的伤害破坏范围见表 2:

表 2 火灾的伤害破坏范围
Tab.2 Scope of the fire damage

名称	伤害破坏范围/m
死亡半径	6.74
重伤半径	8.25
轻伤半径	11.675
临界半径	20.64

参考文献

- [1] 芦双京. 事故树分析法在汽油等易燃易爆风险评价中的应用[J]. 河北环境科学, 2004, (4): 46-47.
- [2] 崔克清. 安全工程燃烧爆炸理论与技术[M]. 北京: 中国计量出版社, 2005.
- [3] 肖桂平, 朱晓宁. 交通安全工程(第二版)[M]. 北

京: 中国铁道出版社, 2011.

综上所述, 人员避难时需在短时间内撤出 20 m 之外, 才能免受到高温侵袭, 消防人员也需在临界半径之外方能进行工作。

3 结 论

针对此次事故的原因分析, 得出如下规律性结论:

(1) 油罐车是运输危险货物的载体, 车辆的安全技术状况好与否, 将直接关系到危险货物运输的安全性。出车前必须对车辆的安全技术状况进行认真检查, 发现故障排除后方可投入运行。

(2) 危险品运输的事故隐患主要是从泄漏开始的。由于油罐车行车途中车辆颠簸震动, 往往容易造成包装破损, 因此, 行车途中加强对货物的管理, 运输途中应防曝晒、雨淋, 防高温。中途停留时应远离火种、热源、高温区。公路运输时要按规定路线行驶, 勿在居民区和人口稠密区停留。

(3) 提高技术装备水平。运输时运输车辆应配备相应品种和数量的消防器材及泄漏应急处理设备, 提高事故救援能力, 把事故损失和影响降到最低。运输时所用的槽(罐)车应有接地链, 槽内可设孔隔板以减少震荡产生静电, 严禁与氧化剂、酸类、碱金属、食用化学品等混装混运, 装运该物品的车辆排气管必须配备阻火装置, 禁止使用易产生火花的机械设备和工具装卸。

(4) 提高专业队伍素质。要根据铁路危险货物运输的特殊性、复杂性, 明确危险货物运输安全管理机构职责, 保证危险货物运输管理人员相对稳定。要加强专业技术培训, 不断提高从业人员的业务素质。

(中文编辑: 吴继屏)