

油库安全的事故树分析法

基金项目:四川省重点学科建设资助项目(SZD0416)

张琳¹,罗小武²,江伍英²,苏欣¹,宋淑贞³

(1.西南石油大学,四川成都 610500; 2.新疆克拉玛依油田油气储运分公司生产调度中心,新疆克拉玛依 834000; 3.中国石油化工股份有限公司浙江杭州石油分公司,浙江杭州 310000)

摘要:文章用事故树法分析了油库的安全可靠性。以油库的燃烧爆炸为顶端事件,考虑了45个基本事件,建立了一个比较完整的事故树,通过分析得到10个最小径集,并计算出了各自的重要度,找出了油库安全的主要隐患,提出了改进措施,提高了油库运行的可靠性。事故树分析法具有直观、易懂和灵活的特点,为油库的安全可靠性评价提供了一种新的科学可行的方法。

关键词:油库;安全;评价;管理;事故树分析法

中图分类号:TE972.01 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-2206(2006)03-0011-04

0 引言

油库是储存油料的基地,油料具有易燃、易爆、易挥发等特点,这些潜在危险因素可能给油库工作人员、用户和周围环境造成一定风险和危害,如何消除和减轻这些风险和危害,建立科学的油库安全评判体系,历来是油库安全研究和管理的重要工作。

油库安全评价的方法很多,传统的方法主要是专家打分法。一些新的评价方法也应用在了油库安全评价中,例如笔者最近用模糊综合评价法对油库安全进行了定性分析^[1-2],郑贤斌等将人工神

经网络引入油库安全评价^[3],同时他和李自力也详细介绍了美国道化学公司的DOW火灾爆炸指数评价法在油库中的应用^[4]等。随着可靠性理论的兴起,一种基于事故树(FAT FAULT TREE)的系统可靠性和安全性分析方法也得到了广泛应用。有些文献也用油库安全的事故树^[5],但不是很完善,本文试图建立一个比较完整的油库爆炸事故树,从而为油库管理者对油库进行安全管理提供科学依据。

1 事故树(FAT)

1.1 事故树简介

参考文献:

- [1] Warren R True. Composite Wrap Approved for U.S. Gas-pipeline Repairs[J]. Oil & Gas Journal, 1995,(2): 54-55.
- [2] 卢绮敏,翁永基,王国丽.埋地管道腐蚀安全综合评价、管理技术体系的研究[A].第四届全国腐蚀大会论文集[C].中国腐蚀与防护学会,北京:2003.332-335.
- [3] [美]William A. Bruce著.管道腐蚀:检测、评估与维修[A].李春兰译.95国际管道技术会议论文集 [C].北京:石油工业出版社,1996.420-427.
- [4] 赵炳刚,陈群尧,胡士信.石油工业涂料与涂装技术[M].北京:化学工业出版社,2002.180-192.
- [5] 刘铁民.穿插法修复旧管道用聚乙烯的改性研究[D].西安:西北工业大学,2004.6-12.
- [6] John Kiefner. Composite Reinforcement Sleeves Speed Pipeline Repairs [J]. Pipeline & Gas Journal, 1996,(1): 1-3.
- [7] 俞蓉蓉,蔡志章.地下金属管道的腐蚀与防护[M].北京:石油工
业出版社,2001.229-234.
- [8] 林永志,王明岐.U型高密度聚乙烯管内衬法地下管道修复技术 [J].煤气与动力,2002,12(6): 500-502.
- [9] 米琪,刘殿博.采用翻转内衬技术修复管道[J].油气储运,2000,19 (1): 58-59.
- [10] 董建光.利用胀管技术进行管线更新[J].非开挖技术,2005,22 (3): 135-139.
- [11] Lan Clarke著.用于胀管法和水平定向钻进法施工的带保护管材[J].霍宇翔译.非开挖技术,2005,22(3): 150-151.

作者简介:宋生奎(1973-),男,辽宁新民人,1996年毕业于抚顺石油学院石油储运专业,2002年进入石油大学(北京)石油工程学院攻读油气储运工程专业硕士学位,现为江苏徐州空军学院航空油料物资系讲师,从事管道输送工艺及维修工程方面的教学与科研工作。

收稿日期:2005-09-26; **修回日期:**2006-02-28

事故树法是对一种系统进行可靠性和安全性分析的有效手段，尤其在解决复杂系统的分析问题上赢得了声誉。由于油库安全因素和油库系统本身的复杂性，因此事故树法能够应用于油库的安全评价中。

事故树分析方法是一种图形逻辑演绎方法，是某一种失效状态在一定条件下的逻辑推理方法，通过层层深入分析，把所有的失效原因、失效模式用逻辑和或逻辑积的关系绘制成的一个树枝形。它只包括那些对顶端事件有贡献的事故，而且这些事故并不是全部所有的事故，只包括那些分析者认为最有可能发生的事故。通过事故树定性分析，找出导致顶端事件发生的所有故障模式；通过定量分析，求出顶端事件发生的概率和各底事件的重要度、概率重要度，从而根据事故的严重等级采取相应的措施^[6]。

事故树分析一般分为以下几个阶段：

(1) 合理选择顶端事件，对于油库来说，一般选择“燃烧爆炸”作为顶端事件。

(2) 建立事故树，这是FAT的核心部分，通过对已有资料的分析，在油库设计和运营人员的帮助下，建立事故树。

(3) 建立事故树的数学模型，对事故树进行简化或模块化。

(4) 进行可靠性的定性和定量分析。

1.2 油库燃烧与爆炸事故树

根据以上步骤，我们考虑了45个基本事件(见表1)^[5-7]，建立了以“油库燃烧爆炸”为顶端事件的事故树(见图1)。

1.3 定性定量分析

事故树定性分析的目的就是要找出最小割集或最小径集，从而找出系统最薄弱的环节，提高系统的可靠性和安全性。如果事故树中的“与门”越多，则最小割集就越少，说明系统就越安全；反之，如果事故树中“或门”越多，则最小割集就越多，说明系统就越不安全^[8]。在求最小割集时常采用“上行法”(Semanderes)和“下行法”(Fussell-Vasely)，或利用对偶原理求最小径集，从而依次找出事故发生的原因及控制点，根据控制要点进而进行多因素之间的安全关联分析。

图1事故树中有“或门”5个，“与门”15个，如果采用“上行法”(Semanderes)或“下行

表1 事故树事件表

事件代号	事件	事件代号	事件	事件代号	事件
F	燃烧爆炸	X3	阻火器失效	X25	腐蚀穿孔
F1	火源	X4	机动车排烟喷火	X26	疲劳应力破坏
F2	油气混合物浓度	X5	油蒸气散发点与明火散发点距离不够	X27	设计不合理
F3	明火	X6	防爆电器设备损坏	X28	选材不当
F4	电火花	X7	使用铁制工具	X29	施工质量低
F5	机械火花	X8	穿带铁钉的鞋	X30	地震破坏
F6	静电火花	X9	机械碰撞	X31	违章作业
F7	其他火花	X10	人为破坏	X32	避雷器损坏
F8	通风不良	X11	外部火灾	X33	接地不良
F9	油品泄漏	X12	隔油池失效引入外部火	X34	设计缺陷
F10	电气火花	X13	无通风设施	X35	流速过快
F11	雷击火花	X14	通风设施损坏	X36	管壁粗糙
F12	非人体静电	X15	未定时通风	X37	使用化纤布料
F13	人体静电	X16	违章操作	X38	油液飞溅
F14	罐体损坏	X17	绝缘老化	X39	接地电阻超标
F15	其他原因	X18	短路	X40	未接地
F16	避雷器失效	X19	电流过大	X41	损坏
F17	静电聚集	X20	雷击	X42	计量时间不够
F18	接地不良	X21	未穿防静电工作服	X43	计量器具不合格
F19	违章操作	X22	作业中与导体接触	X44	用塑料桶装油
X1	库内吸烟	X23	阀门密封不良	X45	其他
X2	库内违章动火	X24	法兰密封不良		

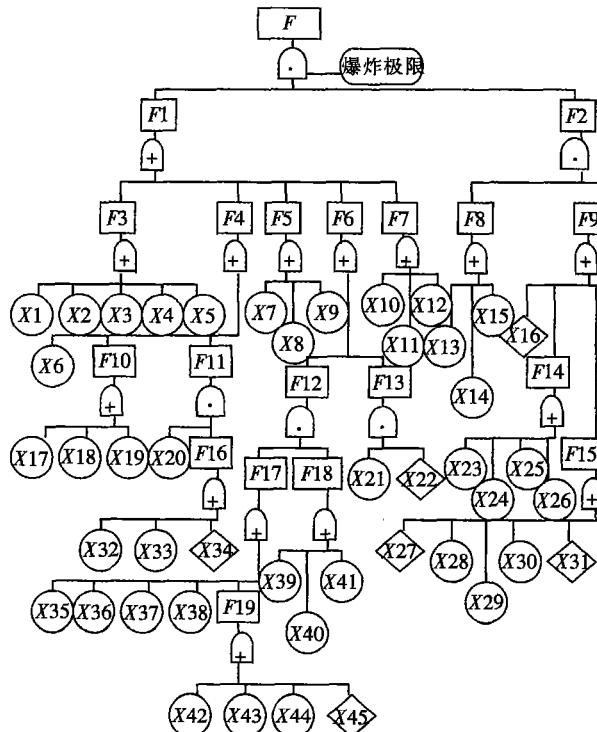


图1 油庫燃烧爆炸事故树

法”(Fussell-Vasely)求最小割集，那么无论结果还是过程都相当复杂繁琐，下面介绍利用对偶原理，通过求成功树的最小径集来进行定性分析。

对偶事故树(dual fault tree)简称对偶树，将

二状态事故树中的“与门”换为“或门”，“或门”换为“与门”，底事件、顶事件不变，这样得到的事故树称为原事故树的对偶事故树。利用相对偶系统的性质，则事故树的最小割集就是对偶树的最小径集^[8]。最小径集的求法是利用最小径集与最小割集的对偶性，将事故树的“与门”全部换为“或门”，“或门”换成“与门”，所有事件都加“'”成原事件补，形成成功树。成功树的最小割集就是原事故树的最小径集。于是得到：

$$\begin{aligned}
 F' &= F1' + F2' \\
 &= F3'F4'F5'F6'F7' + F8' + F9' \\
 &= X1'X2'X3'X4'X5'X6'F10'F11'X7'X8'X9' \\
 &\quad F12'F13'X10'X11'X12' + X13'X14'X15' + \\
 &\quad X16'F14'F15' \\
 &= X1'X2'X3'X4'X5'X6'X7'X8'X9'X10'X11' \\
 &\quad X12'X17'X18'X19' (X20' + X32'X33'X34') \\
 &\quad \times (X35'X36'X37'X38'X42'X43'X44'X45' + \\
 &\quad X39'X40'X41') \times (X21' + X22') + X13' \\
 &\quad X14'X15' + X16'X23'X24'X25'X26'X27' \\
 &\quad X28'X29'X30'X31'
 \end{aligned}$$

经过化简，得到 10 个最小径集：

$$P_1 = \{X1, X2, X3, X4, X5, X6, X7, X8, X9, X10, X11, X12, X13, X14, X15, X16, X17, X18, X19, X20, X21, X35, X36, X37, X38, X42, X43, X44, X45\}$$

$$P_2 = \{X1, X2, X3, X4, X5, X6, X7, X8, X9, X10, X11, X12, X13, X14, X15, X16, X17, X18, X19, X20, X21, X39, X40, X41\}$$

$$P_3 = \{X1, X2, X3, X4, X5, X6, X7, X8, X9, X10, X11, X12, X13, X14, X15, X16, X17, X18, X19, X20, X22, X35, X36, X37, X38, X42, X43, X44, X45\}$$

$$P_4 = \{X1, X2, X3, X4, X5, X6, X7, X8, X9, X10, X11, X12, X13, X14, X15, X16, X17, X18, X19, X20, X22, X39, X40, X41\}$$

$$P_5 = \{X1, X2, X3, X4, X5, X6, X7, X8, X9, X10, X11, X12, X13, X14, X15, X16, X17, X18, X19, X21, X32, X33, X34, X35, X36, X37, X38, X42, X43, X44, X45\}$$

$$P_6 = \{X1, X2, X3, X4, X5, X6, X7, X8, X9, X10, X11, X12, X13, X14, X15, X16, X17, X18, X19, X22, X32, X33, X34, X35, X36, X37, X38, X42, X43, X44, X45\}$$

$$P_7 = \{X1, X2, X3, X4, X5, X6, X7, X8, X9, X10, X11, X12, X13, X14, X15, X16, X17, X18, X19, X21, X32, X33, X34, X39, X40, X41\}$$

$$P_8 = \{X1, X2, X3, X4, X5, X6, X7, X8, X9, X10, X11, X12, X13, X14, X15, X16, X17, X18, X19, X22, X32, X33, X34, X39, X40, X41\}$$

$$P_9 = \{X13, X14, X15\}$$

$$P_{10} = \{X16, X23, X24, X25, X26, X27, X28, X29, X30, X31\}$$

于是得到了一个 3 阶最小径集，一个 10 阶最小径集，两个 24 阶最小径集，两个 26 阶最小径集，两个 29 阶最小径集，两个 31 阶最小径集。从 10 个最小径集可以看出， $X1, X2, X3, X4, X5, X6, X7, X8, X9, X10, X11, X12, X13, X14, X15, X16, X17, X18, X19$ 具有相同的重要度； $X13, X14, X15$ 具有相同的重要度； $X23, X24, X25, X26, X27, X28, X29, X30, X31$ 具有相同的重要度； $X32, X33, X34$ 具有相同的重要度； $X35, X36, X37, X38, X42, X43, X44, X45$ 具有相同的重要度； $X16, X20, X21, X22$ 各自重要度不同，因此只需计算 $X1, X13, X16, X20, X21, X22, X23, X32$ 和 $X35$ 的重要度，重要度计算如下：

$$I_\Phi(X1) = \frac{1}{2^{22}} + \frac{1}{2^{24}} + \frac{1}{2^{27}} + \frac{1}{2^{29}}$$

$$I_\Phi(X13) = \frac{1}{2^2} + \frac{1}{2^{22}} + \frac{1}{2^{24}} + \frac{1}{2^{27}} + \frac{1}{2^{29}}$$

$$I_\Phi(X16) = \frac{1}{2^9} + \frac{1}{2^{22}} + \frac{1}{2^{24}} + \frac{1}{2^{27}} + \frac{1}{2^{29}}$$

$$I_\Phi(X20) = \frac{1}{2^{22}} + \frac{1}{2^{27}}$$

$$I_\Phi(X21) = I_\Phi(X22) = \frac{1}{2^{23}} + \frac{1}{2^{25}} + \frac{1}{2^{28}} + \frac{1}{2^{30}}$$

$$I_\Phi(X23) = \frac{1}{2^9}$$

$$I_\Phi(X32) = \frac{1}{2^{24}} + \frac{1}{2^{29}}$$

$$I_{\Phi}(X35) = \frac{1}{2^{27}} + \frac{1}{2^{29}}$$

$$I_{\Phi}(X39) = \frac{1}{2^{22}} + \frac{1}{2^{24}}$$

所以得到：

$$\begin{aligned} I_{\Phi}(X23) &= \dots = I_{\Phi}(X31) > I_{\Phi}(X13) > I_{\Phi}(X16) = I_{\Phi}(X14) = I_{\Phi}(X15) > I_{\Phi}(X1) = I_{\Phi}(X2) = \dots = I_{\Phi}(X12) = I_{\Phi}(X17) = I_{\Phi}(X18) \\ &= I_{\Phi}(X19) > I_{\Phi}(X39) = I_{\Phi}(X40) = I_{\Phi}(X41) \\ &> I_{\Phi}(X21) = I_{\Phi}(X22) > I_{\Phi}(X32) = I_{\Phi}(X33) = I_{\Phi}(X34) > I_{\Phi}(X35) = \dots = I_{\Phi}(X38) = I_{\Phi}(X42) = \dots = I_{\Phi}(X45) \end{aligned}$$

2 改进措施

通过事故树分析，可以看出，油库安全的主要隐患是泄漏和火源。其中重要度较大的是“罐体损坏”（阀门和法兰密封不良等）、“通风不良”和容易引起各种火花的基本事件。要确保油库的安全，就必须从以下几方面着手^[5,7,10]：

(1) 定期检查阀门和法兰的密封状况，防止泄漏。检查泄漏现在较有效的方法是安装智能检测仪表和报警器；定期检查通风设施工作状况，确保定时通风；一旦发现泄漏，应立即采取通风、吹扫等措施进行处理，并立即堵漏，防止泄漏进一步扩大。

(2) 定期检查罐体状况，防止因腐蚀等原因造成罐体开裂；对于新建油库，在油罐施工中，必须严格按照设计要求选材，加强对施工材料材质的检查，建立严格的施工质量检查制度，并严格执行，选择合理的焊接工艺和高水平的焊工。

(3) 严格控制火源，防止开闭油罐出入口时的撞击，须将其出入口加胶圈保护；必须穿符合规定的服装和工鞋，罐区内严禁穿钉子鞋、化纤衣服；严禁在库内使用手机和非防爆电器等；油罐设备良好接地或使用消电器等防止静电积聚；设立明显的禁烟标志；进入罐区的机动车辆应安装排气管火星熄灭装置；安装避雷针等防雷装置；减少铁制器具的撞击与摩擦。

(4) 对于违章操作，不仅要严格处理，而且更加重要的是要在平时加强安全教育培训，经常性开展安全教育与业务技能培训，同时要增强员工的责任心。

3 结论

(1) 本文建立了以油库“燃烧爆炸”为顶端

事件的事故树，考虑了45个基本事件，经过分析得到了10个最小径集，其中一个3阶最小径集，一个10阶最小径集，两个24阶最小径集，两个26阶最小径集，两个29阶最小径集，两个31阶最小径集。

(2) 计算出了各基本事件的重要度，找出了油库安全的主要隐患，提出了主要的改进措施，为油库的安全管理和运行提供了科学依据，提高了油库运行的可靠性。

(3) 事故树(FAT)的这种直观、易懂和灵活的特点，为油库的安全可靠性评价提供了一种新的科学可行的方法。但是，这种方法的关键在于正确建立油库安全事故树，而油库安全涉及因素多，所以不仅要对油库的生产工艺流程、各设备的操作使用方法、使用环境及相关人员的状况做到心中有数，而且要掌握多种学科，才能做出科学、可靠、适用的事故树分析。一旦建立的事故树不正确，不仅不能进行安全评价，反而会带来危险。因此，必须在实际工作中进一步完善此事事故树。

参考文献：

- [1] 苏欣,黄坤,范小霞,等.油库安全评价模型及其应用[J].石油工程建设,2006,32(2):18-20.
- [2] 黄坤,朱洪杰,苏欣,等.油库安全评价方法现状[J].石油工程建设,2006,32(1):1-7.
- [3] 郑贤斌,陈国明.基于人工神经网络的油库安全综合评价方法[J].人类工效学,2004,10(2):13-16,19.
- [4] 郑贤斌,李自力.DOW火灾爆炸指数评价法在油库中的应用[J].油气储运,2003,22(5):49-52.
- [5] 于倩秀.事故树分析方法在油库安全管理中的应用[J].石油库与加油站,1999,8(5):15-17.
- [6] 维齐利 WE(美).故障树手册[M].疏松佳,唐信青译.北京:原子能出版社,1987.
- [7] 黄昆,蒋宏业,李余斌,等.LPG储罐火灾与爆炸事故树分析[J].西南石油学院学报,2004,26(5):74-76.
- [8] 冯肇瑞,崔国璋.安全系统工程[M].北京:冶金工业出版社,1987.
- [9] 钟毓宁,邬华芝,唐家才.机电产品可靠性应用[M].北京:中国计量出版社,1999.
- [10] 蒋宏业,姚安林,郑兴华,等.天然气球罐失效故障树分析[J].天然气工业,2003,23(6):143-145.

作者简介：张琳（1981—），女，四川南充人，2004年毕业于西南石油大学油气储运专业，现在西南石油大学攻读油气储运专业硕士学位。

收稿日期：2006-03-01



PETROLEUM ENGINEERING CONSTRUCTION

Bi - Monthly

Established in 1975

ISSN 1001 - 2206

CODEN SGJIE9

4348BM

Tel/Fax 8622-66310255

Vol.32 No.3 Serial No.190 June 2006

Sponsor:China National Petroleum Corporation(CNPC)

Publisher/Editor:Research Inst. of Petroleum Eng. Technology

Address:40 Jintang Highway,Tanggu,Tianjin 300451, P.R.China

Distributor:China International Book Trading Corporation

P.O.Box 399,Beijing 100044,P.R. China

CONTENTS & ABSTRACTS

• SPECIAL TOPICS •

(1) New Development in Surface Modification Technique for Improving Adhesion Property of Polyethylene Coating in Oil and Gas Pipelines

WANG Hui-liang(Department of Chemistry, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: This article briefly reviews the current status and recent developments of the anticorrosion coating technology used in oil and gas transportation pipelines, and the joint coating technique using mainly polyethylene. It also reviews the recent developments in the surface modification technique for improving the adhesion property of polyethylene coating. This article emphasizes on a new polymer surface UV initiated grafting technique invented by the author during his work abroad, this technique has a lot of advantages, such as easy processing, high practicality, over other methods. The critical factors affecting the adhesion property of the grafted polymer are also discussed.

Key words: oil and gas pipeline; anticorrosion; polyethylene coating; UV photografting; adhesion property

(7) Present Situation and Development Trend of Trade in Repairing Petroleum Pipeline

SONG Sheng-kui(Department of Aviation Oil and Material, Xuzhou Airforce College, Xuzhou 221006, China), SHI Yong-chun, ZHU Kun-feng, et al.

Abstract: With the operation time extention, various flaws, faults and damages occur with the effects of internal and external causes in petroleum pipeline. Thus different repairing techniques should be adopted to build pipeline integrity. External repairing method with excavation and internal repairing method without excavation are summarized, and different repairing processes and their features are introduced in this paper. The present disparity in pipeline rehabilitation trade between foreign countries and our country as well as the domestic development trend are pointed out.

Key words: petroleum pipeline; corrosion; internal repairing; external repairing; development trend

• RESEARCH & DISCUSSION •

(11) Fault Tree Analysis of Oil Depot Safety

ZHANG Lin (Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China), LUO Xiao-wu, JIANG Wu-ying, et al.

Abstract: This paper analyzes the safety and reliability of an oil depot. Taking burning and blasting of oil depot as top event and considering 45 basic events, a relatively integrated fault tree is established. Through analysis, 10 minimum path sets are obtained and corresponding importance degrees are calculated. The main hidden troubles are found and measures improving reliability of depot run are provided. Fault tree analysis method has the features of intuition, understandability and flexibility, provides a new scientific and feasible method for assessing safety and reliability of oil depot.

Key words: oil depot; safety; assessment; management; fault tree analysis method

(15) Experimental Study of Mechanical Characteristics of Cemented Soil with High Moisture Content