

# 原油储罐施工作业事故树分析

姚 爽 (大庆亚兴安全科技股份有限公司天津分公司, 天津 300300)

高小龙 (天津北海油人力资源咨询服务有限公司, 天津 300450)

**摘 要:** 原油作为我国的主要能源, 在我国的石油化工企业中大量使用, 原油具有易燃烧性、易挥发性、易爆炸性等特点, 主要储存在钢制储罐内, 石油化工企业在原油储罐施工作业时可能存在的安全隐患主要为火灾爆炸、中毒和窒息, 一旦发生事故, 势必造成重大损失。因此在施工作业管理过程中可通过事故树进行分析, 有针对性地提出风险控制措施, 降低施工作业过程中原油储罐发生火灾、爆炸以及中毒和窒息事故的风险。

**关键词:** 储罐; 事故树分析; 风险控制措施

## 0 引言

事故树分析法在系统安全性分析、风险评价中具有很重要的地位和作用。通过事故树分析可以识别事故发生的原因, 找出设备、物料、环境与人为失误的逻辑关系, 通过辨识为我们提供避免或减少事故发生的途径, 降低事故发生的概率; 有利于分析系统内潜在的和固有的各类危险有害因素, 为前期设计、施工过程和管理提供科学的依据; 近年来, 事故树分析法在化工等领域得到了广泛的应用。

## 1 事故树分析过程

### 1.1 事故树分析 (FTA) 基本程序 (步骤)

①收集原油储罐施工作业事故案例, 对事故案例进行统计分析, 得出事故发生后果严重、风险性高的是: 火灾爆炸, 中毒和窒息; ②确定原油储罐施工作业可能发生的风险 (顶上事件: 火灾爆炸, 中毒和窒息); ③调查原因事件: 调查与储罐施工作业火灾爆炸, 中毒和窒息有关的所有直接原因和间接原因 (设备、人员、环境等因素); ④编制事故树: 从火灾爆炸, 中毒和窒息事故做为顶上事件开始, 一级一级往下找出事故的原因事件, 一直找到最基本的原因事件为止, 按照事件之间的逻辑关系画出事故树。

### 1.2 最小割集

#### 1.2.1 割集和最小割集

在事故树中能够导致顶上事件发生的基本事件的集合称作割集; 割集中全部基本事件都发生时, 顶上事件一定会发生。能够导致顶上事件发生的最小限度的基本事件集合。换言之, 如果最小割集中的任何一个基本事件都不发生, 则顶上事件也就不会发生。

#### 1.2.2 最小割集的求法

对于已经化简的事故树, 将事故树的结构函数式进行展开运算, 求得的每项就是各个最小割集; 对于

没有进行化简的事故树, 需要采用布尔代数法 (如吸收率、德·摩根律等) 进行处理, 然后得到最小割集。

### 1.3 最小径集在事故树分析中的作用

①最小径集表示系统的安全性; ②通过最小径集可以知道, 能够使顶上事件不发生的途径有几种可能, 从而为减少事故的发生提供依据; ③利用最小径集可以对结构重要度进行分析, 并且可以求出顶上事件火灾爆炸以及中毒和窒息事故发生的概率; ④一个最小径集中所有的基本事件如果都不发生, 那么顶上事件火灾爆炸以及中毒和窒息事故也就不会发生, 事故树求得的最小径集如果越多, 说明系统也就越安全。

### 1.4 结构重要度

从事故树的结构上对各个基本事件进行分析, 各个基本事件的发生对顶上事件火灾爆炸以及中毒和窒息事故发生所产生的影响。

结构重要度系数的计算公式如下:

$$I(i) = \sum_{X_i \in K_j} \frac{1}{2^{x_j-1} P_j}$$

根据计算结果对每个基本事件进行结构重要度排序。

## 2 原油储罐火灾爆炸事故树分析

### 2.1 确定顶上事件

将储罐发生火灾爆炸事故作为顶上事件进行事故树分析。

### 2.2 画出事故树

从顶上事件火灾爆炸开始, 结合上述原因事件的分析, 层层分析其发生原因, 一直分析到基本事件为止, 即得事故树 (见图 1)。

### 2.3 事故树定性分析

将事故树的结构函数式展开运算, 然后对所得的

各项运用布尔代数法（如结合律、分配律、吸收律等）进行处理，得到最小割集，再利用最小割集求出结构重要度。

### 2.3.1 最小割集

由图 1 事故树可见，顶上事件：

$$T=M_2 \times M_1=(X_8+X_9+X_{10}+M_7)(M_3+M_4)=(X_8+X_9+X_{10}+X_{11}+X_{12})(X_1M_5M_6+X_6+X_7)=(X_1(X_2+X_3)(X_4+X_5))(X_8+X_9+X_{10}+X_{11}+X_{12})=(X_8+X_9+X_{10}+X_{11}+X_{12})(X_1X_2+X_1X_3)(X_4+X_5)$$

采用布尔代数法，可以求得事故树的 30 个最小割集： $\{X_1, X_2, X_4, X_8\}$ ,  $\{X_6, X_8\}$ ,  $\{X_1, X_3, X_4, X_8\}$ ,  $\{X_1, X_2, X_5, X_8\}$ ,  $\{X_1, X_3, X_5, X_8\}$ ,  $\{X_7, X_8\}$ ,  $\{X_1, X_2, X_4, X_9\}$ ,  $\{X_1, X_2, X_4, X_{11}\}$ ,  $\{X_6, X_9\}$ ,  $\{X_1, X_2, X_4, X_{10}\}$ ,  $\{X_6, X_{11}\}$ ,  $\{X_1, X_3, X_4, X_9\}$ ,  $\{X_6, X_{10}\}$ ,  $\{X_1, X_3, X_4, X_{11}\}$ ,  $\{X_1, X_3, X_4, X_{10}\}$ ,  $\{X_1, X_2, X_5, X_9\}$ ,  $\{X_1, X_2, X_5, X_{11}\}$ ,  $\{X_1, X_2, X_5, X_{10}\}$ ,  $\{X_1, X_3, X_5, X_9\}$ ,  $\{X_1, X_3, X_5, X_{11}\}$ ,  $\{X_1, X_3, X_5, X_{10}\}$ ,  $\{X_7, X_9\}$ ,  $\{X_7, X_{11}\}$ ,  $\{X_7, X_{10}\}$ ,  $\{X_1, X_2, X_4, X_{12}\}$ ,  $\{X_6, X_{12}\}$ ,  $\{X_1, X_3, X_4, X_{12}\}$ ,  $\{X_1, X_2, X_5, X_{12}\}$ ,  $\{X_1, X_3, X_5, X_{12}\}$ ,  $\{X_7, X_{12}\}$ 。

说明顶上事件火灾爆炸事故发生的可能性有 30 种，这 30 个割集中任何一个所包含的基本事件如果同时发生，都有可能导致顶上事件火灾爆炸事故的发生，可见事故的风险较高。

### 2.3.2 结构重要度分析

为了预防施工作业火灾爆炸事故的发生，采用最小径集进行分析。原油储罐火灾爆炸事故树的最小径集有 4 个： $\{X_1, X_6, X_7\}$ ,  $\{X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}\}$ ,  $\{X_4, X_5, X_6, X_7\}$ ,  $\{X_2, X_3, X_6, X_7\}$ 。这四个最小径集中的任意一个径集包含的基本事件都不会不发生，那么顶上事件就不会发生。

采用最小径集方法，求出原油储罐施工作业事故树的每项基本事件的结构重要度的排序为：

$$I[X_6]=I[X_7]>I[X_1]>I[X_8]=I[X_9]=I[X_{10}]=I[X_{11}]=I[X_{12}]>I[X_2]=I[X_3]=I[X_4]=I[X_5]$$

### 2.4 分析结果及措施

经过对储罐的火灾爆炸进行事故树分析，得出该事故树共有 4 个最小径集和 30 个最小割集，也就是说储罐发生火灾爆炸事故有 30 种可能性，但从 4 个最小径集可以得出，只要采取最小径集方案中的任何一个，储罐火灾爆炸事故就可避免。第一方案  $\{X_1, X_6, X_7\}$ ，在施工作业前清理现场的可燃物，施工现

场使用防爆电气并检测可燃气体的浓度。第二方案  $\{X_2, X_3, X_6, X_7\}$ ，施工现场无吸烟、静电火花等点火源，施工现场使用防爆电气并检测可燃气体的浓度，避免可燃气体达到爆炸极限。第三方案  $\{X_4, X_5, X_6, X_7\}$ ，加强施工现场的通风，控制液体和固体可燃物的数量，避免可燃物聚集，施工现场使用防爆电气并检测可燃气体的浓度。第四方案  $\{X_8, X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}\}$ ，施工作业时使用与现场相符的防爆电气，施工作业现场严禁吸烟，金属装备、工具要做到轻拿轻放，以免发生碰撞产生火花。

## 3 原油储罐中毒和窒息事故树分析

### 3.1 确定顶上事件

在施工过程中储罐内作业属于受限空间作业，且储罐储存物质为原油，且会在储罐内进行焊接作业，因此在作业过程中可能发生中毒和窒息事故，将中毒和窒息作为顶上事件进行事故树分析。

### 3.2 画出事故树

从顶上事件中毒和窒息开始，结合上述原因事件的分析，层层分析其发生原因，一直分析到基本事件为止，即得事故树（见图 2）。

表 1 中毒和窒息事故树符号意义对应表

| 符号  | 意义              | 符号 | 意义               |
|-----|-----------------|----|------------------|
| T   | 中毒和窒息事故         | A  | 盲目进入受限空间         |
| B   | 有毒气体含量超标或者氧含量过低 | C  | 个体防护措施未起作用       |
| A1  | 未对受限空间内气体进行检测   | A2 | 受限空间内气体检测结果错误    |
| B1  | 未对受限空间进行通风      | B2 | 管道阀门未进行有效隔绝      |
| B3  | 受限空间未清洗感觉有毒气体释放 | C1 | 未穿戴个体防护设备        |
| C2  | 所佩戴个体防护设备不满足要求  | X1 | 安全意识欠缺           |
| X2  | 缺少分析仪器          | X3 | 分析仪器故障           |
| X4  | 分析操作失误          | X5 | 没有通风设施或者通风设施能力不足 |
| X6  | 人员操作失误          | X7 | 未佩戴个体防护装备        |
| X8  | 个体防护装备选择错误      | X9 | 个体防护装备选择不当       |
| X10 | 个体防护装备有缺陷       |    |                  |

### 3.3 事故树定性分析

将事故树的结构函数式进行展开运算，然后对所求得的各项运用布尔代数法（如结合律、分配律、吸收律等）进行处理，得到最小割集，再利用最小割集求出结构重要度。

#### 3.3.1 最小割集

由图 2 事故树可见，顶上事件：

$$T=CBA=(C_1+C_2)(B_1+B_2+B_3)(A_1+A_2)=(X_1+$$

$$X_8 + X_9 + X_7 + X_{10}) (3X_1 + X_5 + 2X_6) (X_1 + X_2 + X_3 + X_4)$$

采用布尔代数法,可以求出中毒和窒息事故树共有 25 个最小割集: {X1}, {X2, X5, X7}, {X2, X5, X8}, {X2, X5, X9}, {X2, X5, X10}, {X2, X6, X7}, {X2, X6, X8}, {X2, X6, X9}, {X2, X6, X10}, {X3, X5, X7}, {X3, X5, X8}, {X3, X5, X9}, {X3, X5, X10}, {X3, X6, X7}, {X3, X6, X8}, {X3, X6, X9}, {X3, X6, X10}, {X4, X5, X7}, {X4, X5, X8}, {X4, X5, X9}, {X4, X5, X10}, {X4, X6, X7}, {X4, X6, X8}, {X4, X6, X9}, {X4, X6, X10}。

说明中毒和窒息事故发生有 25 条路径,这 25 个最小割集中的任何一个所包含的基本事件同时发生,都有可能导致事故的发生,由此可见中毒和窒息事故发生的风险较大。

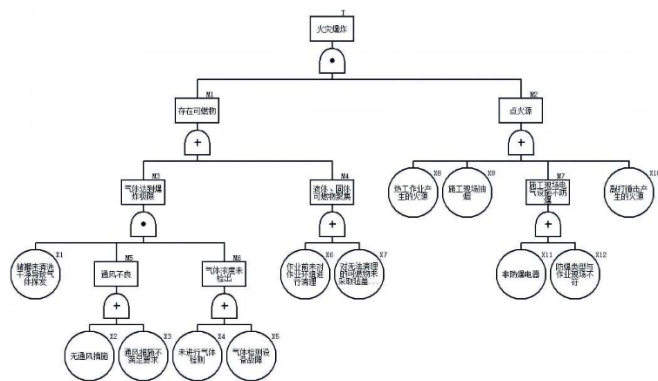


图 1 火灾爆炸事故树

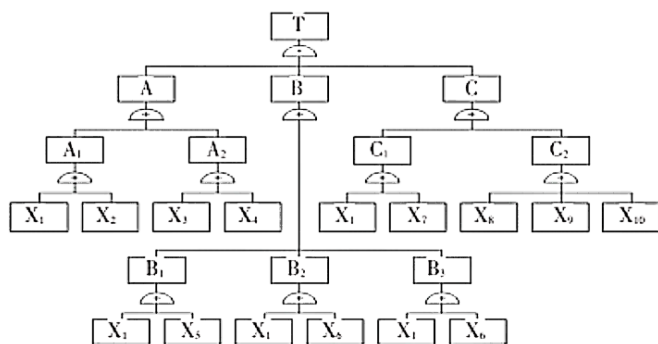


图 2 中毒和窒息事故树

### 3.3.2 结构重要度分析

为了预防原油储罐施工作业过程发生中毒和窒息事故,采用最小径集进行分析,得出事故树的成功树逻辑函数如下:

$$T' = A' + B' + C' = A_1' + A_2' + B_1' + B_2' + B_3' + C_1' + C_2' = X_1' + X_2' + X_3' + X_4' + 3(X_1')X_5'2(X_6') + X_1'X_7'X_8'X_9'X_{10}'$$

由上式可见,事故树有 3 个的最小径集: {X1, X7, X8, X10, X9}, {X1, X3, X2, X4}, {X1, X5,

X6}, 这三个最小径集中的任何一组径集所包含的基本事件都不发生,那么顶上事件中毒和窒息事故也就不会发生。

采用最小径集法,计算得出每个基本事件的结构重要度大小排序如下:

$$I\Phi(1) > I\Phi(5) = I\Phi(6) > I\Phi(2) = I\Phi(3) = I\Phi(4) > I\Phi(7) = I\Phi(8) = I\Phi(9) = I\Phi(10)。$$

### 3.4 分析结果及措施

经过对原油储罐施工作业可能发生的中毒和窒息事故进行事故树分析,得到该事故树共有 3 个最小径集和 25 个最小割集,也就是说原油储罐发生中毒和窒息事故有 25 种可能性,但从 3 个最小径集可得出,只要采取最小径集方案中的任何一个,储罐受限空间的中毒和窒息事故就可避免。第一方案 {X1, X5, X6}, 应定期组织对施工人员进行安全培训,作业过程严格遵守安全操作规程,提高作业人员的安全意识,设置通风设施并保证通风设施的能力。第二方案 {X1, X2, X3, X4}, 应定期组织对施工人员进行安全培训,作业过程严格遵守安全操作规程,提高作业人员的安全意识,设置气体分析仪器并定期检查设备是否完好,对操作人员进行培训教育。第三方案 {X1, X7, X8, X9, X10}, 应定期组织对施工人员进行安全培训,作业过程严格遵守安全操作规程,提高作业人员的安全意识,定期对个体防护装置进行检查,施工人员在作业过程佩戴正确的个体防护装备。

### 4 结论

通过火灾爆炸事故树分析,该事故树各基本事件的结构重要度的排序可以看出,结构重要度最大的事件是作业前对作业环境的清理和对无法清理的可燃物未采取毡盖措施,要高度重视,在施工作业前对施工现场进行检查和确认,降低施工过程中发生火灾爆炸事故的风险。通过中毒和窒息事故树分析,该事故树各基本事件的结构重要度排序可以看出,结构重要度最大的事件是安全意识欠缺,因此建议在施工作业时加大监督检查力度,规范作业人员的操作步骤,严格按照操作规程进行作业,加强对施工作业人员进行安全培训,从根源上控制或降低施工作业人员的中毒和窒息风险。

### 参考文献:

- [1] 纪磊.受限空间作业中毒窒息事故树分析[J]. 神华科技,2017,15(12):3-4,9.
- [2] 郑贤斌,陈国明.油库静电火灾爆炸事故树分析[J]. 化工安全与环境,2003,16(48):13-15.