

# 航天发射场液体推进剂环境风险评价体系研究

刘占卿 刘士锐 郑明强

(北京特种工程设计研究所)

**摘要** 根据液体推进剂性质,分析航天发射场推进剂使用的基本工艺流程和工作单元,提出推进剂环境风险评价体系和风险管理措施,为量化分析航天发射场推进剂环境风险、科学决策环境风险控制方向和内容、准确评估环境风险控制措施与效果提供重要技术支持。

**关键词** 环境风险 源项分析 风险值 风险度 评价

**中图分类号** V551 **文献标识码** A **文章编号** 1674-5825 (2009) 02-0038-04

## 1 引言

环境风险评价是对危险化学品发生突发事件、事故可能的预测和评价。世界环境史上,曾发生过多起震惊世界的重大环境污染事件,其中前苏联切尔诺贝利核电站事故造成的环境影响和后果最为重大。本文针对航天发射场运载火箭和部分导弹所使用的有毒或易燃易爆推进剂,在分析掌握其本身特性的基础上,结合发射场推进剂使用流程和工作内容,全面研究分析了其在运输、储存、检测、转注、加注等各个环节所存在的可能造成人身安全和环境影响的风险,提出了危险源识别、事故率分析、泄漏量计算以及风险度、风险值计算等分析与判别方法,提出了推进剂环境风险评价体系和风险管理措施。

## 2 概述

### 2.1 推进剂种类及特性

目前,国内应用较多的推进剂主要包括肼类、氮氧化物等常温推进剂,以及液氢、液氧等低温推进剂。

#### (1) 肼类

主要包括肼、甲基肼、偏二甲肼、混肼、无水肼等。多与氮氧化物氧化剂组成双组元推进剂,国内目前使用的火箭、部分导弹多使用这种液体推进剂。这类推进剂的主要特点是:均属于强还原剂,呈弱酸性,能溶于水,热稳定性好,闪点低,属二级爆炸物。

危险性表现为:易燃、易爆,具有较强的腐蚀性、刺激性和毒害性。

#### (2) 氮氧化物

主要包括四氧化二氮和硝酸等。其特点是:均属于强氧化剂,不易燃烧,遇水形成硝酸。危险性表现为:遇可燃物易发生爆炸,具有较强的腐蚀性,毒害性和刺激性。

#### (3) 烃类

烃类推进剂种类繁多,目前在发射场得到实际应用的主要是煤油。煤油是石油提炼过程中的分馏产物,包括沸点在 140~285℃的各个馏分。它的特点是:不是单一化合物,是由直链烷烃、环烷烃、芳香烃组成的混合物。危险性表现为:易着火、爆炸,燃烧物对环境构成污染。

#### (4) 液氢

液氢是推进剂中热值最高的一种液体,冰点最低。其特点是:沸点低,常温下呈沸腾状态,无腐蚀性,化学稳定性好。主要危险为:易燃、易爆、易挥发,泄漏危险性大,低温泄漏对人体造成冻伤等。

#### (5) 液氧

液氧是使用最广泛的一种氧化剂,本身不燃烧,化学活性高,稳定性好。危险性表现为:能强烈的助燃,发生着火或爆炸,具有一定腐蚀性,泄漏危险性较大,低温泄漏对人体造成冻伤等。

### 2.2 推进剂使用工艺流程

推进剂使用工艺流程如图 1。

来稿日期:2008-09-23

作者简介:刘占卿(1969.09-),男,博士研究生,主要从事低温系统液氢与液氧燃料的贮存、转注、加注技术研究。

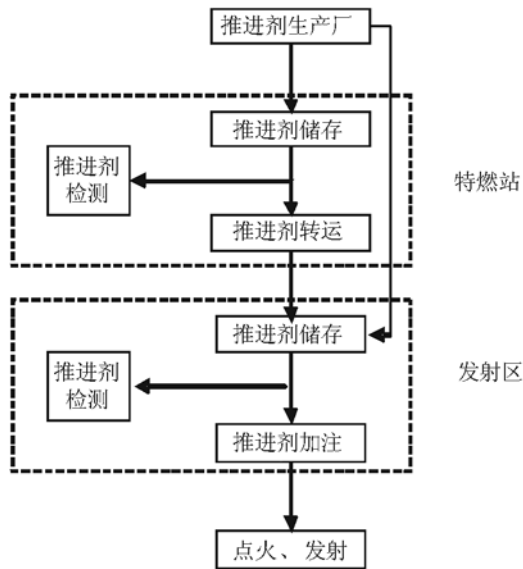


图 1 推进剂使用工艺流程图

推进剂的储存、运输、化验、加注以及废液废气废水的污染治理等是发射场的重要工作内容。对常温推进剂而言具体包括以下工作单元：

(1) 推进剂转注操作。将从推进剂生产厂运至发射场或从特燃库运至发射区的推进剂，由推进剂运输槽车转注至推进剂库房。主要工作包括推进剂槽车与转注站台固定管路间金属软管的连接、拆卸，手动阀门的开启、关闭，气密性检查，槽车、管路的增压、卸压，压力、液位、温度、流量等参数监控，管路排空、残余推进剂处理以及相关故障的排除等工作。槽车内部作业均视为封闭状态，站台作业为敞开体系。

(2) 加注泵间操作。主要工作包括推进剂泵间手动阀门的状态调整，手动灌泵及由此产生的推进剂废液处理，加注/转注泵、电动/气动阀门、流量计、泵间内管路、仪表等工作状态、参数的监视以及相关故障的排除等工作。泵间多为半地下室结构，操作环境属于封闭状态。

(3) 储罐/放空罐间操作。主要工作包括推进剂罐间手动阀门的状态调整，推进剂取样，储罐/放空罐、罐间阀门、管路、液位计等工作状态、参数的监视以及相关故障的排除等工作。罐间也多为半地下室结构，操作环境属于封闭状态。

(4) 火箭推进剂加注/泄回操作。主要工作包括发射塔架固定管路与火箭间金属软管的连接、拆卸，加注/泄出连接器的安装、拆卸，塔上手动阀门状态调整，管路排空，残余推进剂处理，火箭贮箱、塔上管

路、阀门、仪表等状态、参数监视以及相关故障的排除等工作。工作时塔架回转平台处于合拢状态，操作环境属于半封闭状态。

(5) 推进剂质量检验、污染检测以及废液、废气、污水处理。主要对推进剂质量、作业环境污染情况等进行检测，对加注/转注过程中产生的废气、污水等进行处理。一般情况下，这类工作场所距离推进剂库较远。

### 3 推进剂环境风险分析

#### 3.1 推进剂风险识别

##### (1) 物质风险识别

根据物质性质，即易燃、易爆或毒性、腐蚀性等特性，在推进剂使用过程中所涉及的原料、辅料以及产生的废物中，其危险物质识别情况见表 1 所示。

表 1 推进剂使用过程中危险物质识别

序号	推进剂种类	原液	废液	废水	废气
1	肼类	√	√	√	√
2	氮氧化物	√	√	√	√
3	烃类	√	√	√	√
4	液氢	√	√	×	×
5	液氧	√	√	×	×

注：识别为危险源的为√，识别可不作为危险源的为×

##### (2) 危险单元识别

在推进剂使用过程中，根据生产单元危险物质最大可能产生量、周围环境条件，最大可能影响的扩散范围，以及酿成人身伤害和重大财产损失的差别，可识别的危险单元主要有：推进剂废液、废水、废气处理单元；根据以上识别的危险单元所涉及的工作场所，其识别的危险场所主要包括推进剂加注库房泵间，推进剂转注站台，储罐地下室，发射塔架平台、废水废液收集池等。

#### 3.2 推进剂风险源项分析

##### (1) 最大可信事故率

常用于风险源项分析的方法有专家调查法、幕景分析法和事故树分析法。《建设项目环境风险评价技术导则》(HJ-T 169-2004) 推荐采用事故树分析法，其指导思想是，从事件发展初因出发，按照推进剂使用流程的时序、分成时段，对后继事件一步一步地进行分析；每一步都从成功和失败（可能或不可能）两种或多种可能的状态进行考虑，最后用水平树

状图表示其可能后果,以定性、定量的掌握整个事故的动态变化及各种发生可能。

事故树定量计算是首先确定初因事件发生频率和各个事件发生概率,然后计算各条事件序列发生的概率,通过各个事件序列发生概率的矩阵综合分析,即可求得事件发生的总概率。

(2) 泄漏量计算

由于推进剂储罐、管道以及阀门的高可靠性要求,通过系统设计和设备研制建设等全过程严密的质量控制,出现大面积泄漏的概率极低,出现泄漏的情况大多为由于设备加工、腐蚀或者疲劳使用导致的小孔泄漏。因此,本文中对泄漏量的分析主要包括两个方面:有压小孔泄漏和泄漏后的扩散。

① 有压小孔泄漏

根据柏努利流量方程,有压储存液体泄漏推动力取决于液体的势能差以及容器中内部压力  $P_1$  和外部大气压  $P_a$  的差值。其有压小孔泄漏量可表示为:

$$Q=C_d A_r \rho_1 \sqrt{2gh + \frac{2(P_1 - P_a)}{\rho}}$$

式中:  $C_d$ ——排放系数,取决于孔的形状和流动状态。液体一般为:0.6~0.64。

$A_r$ ——泄漏孔所对的有效开阔区域,  $m^2$

$\rho_1$ ——有害液体的密度,  $kg/m^3$

$g$ ——重力加速度,  $m/s^2$

$h$ ——流体的静力势差,  $m$

$P_1$ ——容器内部压力,  $N/m^2$

$P_a$ ——大气压,  $N/m^2$

本公式适合计算瞬间排放速率,不适于计算随着排放时间的延续,压力和液面势差下降的情况。

② 泄漏扩散的估算

有害物质泄漏后迅速蔓延,直至达到最小厚度不能再蔓延为止。关于有害物质扩散的计算在近 10 多年来引起了各界的高度重视,针对有害物质扩散行为的模拟和扩散模式的研究越来越多。推进剂有害物质的泄漏扩散半径是随时间变化的函数,其扩散半径的计算方法可以采用 Shaw 和 Briscoe 公式:

$$\gamma=(t/\beta)^{1/2} \quad \beta=(\pi\rho_1/8gm)^{1/2}$$

即:  $\gamma=(8gmt^2/\pi\rho_1)^{1/2}$

对于连续现象

$$\gamma=(t/\beta)^{3/4} \quad \beta=(\pi\rho_1/32gm)^{1/3}$$

即:  $\gamma=(32gmt^3/\pi\rho_1)^{3/4}$

式中:  $m$ ——质量,  $kg$

$\rho_1$ ——有害液体的密度,  $kg/m^3$

$\gamma$ ——扩散半径,  $m$

$t$ ——扩散时间,  $s$

(3) 泄漏液体蒸发量计算

泄漏液体蒸发分为闪蒸蒸发、热量蒸发和质量蒸发三种,蒸发总量为三种蒸发量的总合。三种蒸发量的计算都有通用计算模式,本文不再详细叙述。常温液体推进剂泄漏和蒸发模式可参照以上公式计算,液氢、液氧等低温推进剂泄漏后蒸散模式较复杂,需专门进行模拟研究。

3.3 推进剂风险计算

(1) 风险度计算

风险度是将风险的概率特性进行量化的一种表示方式。在事故树风险概率分布基础上,通过归一化的数字来描述风险,即风险度( $FD$ )为标准方差  $\sigma$  和  $M_X$  期望值之比,即:

$$FD=\sigma/M_X$$

计算在一定工作日内各概率的风险度,风险度越大,说明风险发生的概率越高,也就是管理中应该改善和加强的部位。

(2) 风险计算

使用环境风险值  $R$  来定量风险的高低,可表示为:

$$R=f(P \times C)$$

其中:  $P$  为推进剂环境风险发生的概率;  $C$  为风推进剂环境险发生后果的严重程度。

有了推进剂环境风险发生概率和后果的严重程度,就可以计算风险值的大小。将最大可信风险值  $R_{max}$  与行业可接受水平  $R_L$  比较,  $R_{max} \leq R_L$  则认为风险值可以接受;  $R_{max} > R_L$  则应进一步采取较少推进剂环境风险的措施,以达到可接受的水平,否则不可接受。通过以上评估方法,为发射场推进剂环境风险的规避和降低风险提供了决策依据,更加明确量化了风险控制的方向和内容,同时也为评价环境控制措施的有效性提供了重要技术手段。

4 推进剂环境风险管理

针对发射场推进剂环境风险值达不到可接受水平的项目或环节,为减轻和消除对环境的危害,应采取减缓措施和环境预案进行风险管理。

4.1 减缓措施



采用事故树法分析时,不同风险概率的风险度不同,风险度大的部位,就是应该采取减缓措施的部位,风险管理就是对风险度大的单元,采取减轻事故后果、事故频率和影响的措施,使事故对环境的影响和人群的破坏达到可接受的水平。

#### 4.2 应急预案

应急预案是根据事故可能发生的各种场景,预先制定的各种应急反应和应急处理方案,以减轻或避免突发事件对环境的影响和人员的伤害。应针对各工作单元产生推进剂突发事故的影响场所、性质和影响深度,采取相应的应急处理方案。一般包括以下几个方面,见表 2 所示。

表 2 推进剂应急预案内容

序号	项目	内容及要求
1	应急计划	推进剂槽车、储罐区、加注间、加注平台、三废处理系统等
2	应急组织机构	特燃站和发射场配套设置推进剂应急组织机构和人员等
3	预警分级响应条件	规定预案的级别及分级响应程序等
4	应急救援保障	应急救援设施和设备、器材等
5	报警、通讯方式	规定应急状态下的报警、通讯方式和交通保障等
6	应急环境监测、抢救、救援及控制措施	专业技术队伍对现场进行侦查监测,对事故性质和后果进行评估,为指挥部门提供决策依据
7	应急检测、防护措施、清除泄漏措施和器材	事故现场、邻近区域、控制区域,控制和清除污染措施和响应设备等
8	人员紧急撤离,应急控制、疏散组织计划	事故现场、邻近区,组织人员紧急撤离及救护,医疗救护及公众健康等保障措施
9	事故应急救援关闭程序与恢复措施	规定应急状态终止程序,事故现场善后处理、恢复措施,邻近区域解除事故警戒及善后恢复措施等
10	应急培训计划	应急计划制定后,按计划安排人员进行培训和演练等
11	公众教育信息	对库区、场区公众开展教育和相关预防知识培训等

## 5 结论

液体推进剂在储运、检测分析、加注、转注和发射过程中,都可能产生突发事件而引发环境事故。通过风险识别、源项分析和最大可信事故率计算,可以分析不同使用单元中各个环节环境风险发生的概率,从而为采取预防和减缓措施,以减少环境事故的发生提供技术依据。同时对不可避免发生的环境事故建立应急预案,最大可能的减少突发事故造成的环境污染和人员伤亡。推进剂环境风险评价体系研

究对减缓或降低航天发射场推进剂突发事故发生的概率,为生态型发射场建设,提高参试人员工作安全环境和保障各项任务的顺利完成都具有积极的指导意义。◇

#### 参 考 文 献

- [1] 黄彩妹,贾 瑛,樊秉安.液体推进剂的环境风险分析和管理对策,上海航天,2003.5.
- [2] 张从主编,环境评价教程,中国环境科学出版社,2002.

## The Research on Environmental Risk Assessment System of Liquid Rocket Propellant in the Spacecraft Launching Complex

LIU Zhanqing LIU Shirui ZHENG Mingqiang

**Abstract:** Most of liquid rocket propellants are inflammable, explosive, toxic and dangerous chemicals. The environmental risk exists in the process of propellants' storage, transportation, analysis, conversion, loading and launching. Based on the nature of liquid rocket propellant, this essay analyses the basic process and working units on the use of those propellant. And it provides the environmental risk assessment system and risk management measures through identifying the dangerous source, analyzing the accident-rate, calculating the leakage rate, risk rate and risk value. The research provides important technical supports on doing the rate model analysis of the environmental risk, getting the scientific decision on the control target and content, and having the accurate assessment on the control measures and effects. The conclusion has the instructive meanings on reducing the rate of urgent incident from propellants and the construction of ecotype spacecraft launching complex.

**Keywords:** environmental risk; source analysis; risk value; risk rate; assessment