

ICS 13.100
A 80



中华人民共和国国家标准

GB/T 37243—2019

危险化学品生产装置和储存设施 外部安全防护距离确定方法

Determination method of external safety distance for hazardous
chemicals production units and storage installations

2019-02-25 发布

2019-06-01 实施

国家市场监督管理总局 发布
中国国家标准化管理委员会

目 次

前言	I
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 外部安全防护距离确定流程	2
5 事故后果法	2
5.1 计算程序	2
5.2 基础资料收集	3
5.3 最严重事故情景确定	3
5.4 外部安全防护距离确定	3
6 定量风险评价法	4
6.1 计算程序	4
6.2 资料数据收集	5
6.3 确定评估单元	5
6.4 危险识别和泄漏场景辨识	6
6.5 泄漏频率分析	8
6.6 事故后果分析	9
6.7 定量风险计算	12
6.8 外部安全防护距离确定	16
附录 A (资料性附录) 评估单元选择方法——危险度评价法	17
附录 B (资料性附录) 评估单元选择方法——设备选择数法	19
附录 C (资料性附录) 同类设备(设施)典型泄漏场景泄漏频率值	25
附录 D (资料性附录) 源项和气云扩散计算	27
附录 E (资料性附录) 探测和联锁切断系统的判定及相应的泄漏时间	43
附录 F (资料性附录) 可燃物质释放事件树及点火概率	44
附录 G (资料性附录) 影响阈值	49
附录 H (资料性附录) 死亡概率与概率值对应关系及物质毒性常数	54
参考文献	55

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准由中华人民共和国应急管理部提出并归口。

本标准起草单位：中国安全生产科学研究院、中石化青岛安全工程研究院、北京理工大学。

本标准主要起草人：魏利军、王如君、多英全、于立见、杨国梁、师立晨、党文义、钱新明、罗艾民、杨春生、宋占兵、张圣柱、褚云、曹炳志、黄兰。

危险化学品生产装置和储存设施 外部安全防护距离确定方法

1 范围

本标准规定了危险化学品生产装置和储存设施外部安全防护距离确定方法。

本标准适用于确定危险化学品生产装置和储存设施外部安全防护距离。

本标准不适用于民爆行业生产、流通企业,烟花爆竹生产企业和储存仓库,汽车加油加气站,油气输送管道,城镇燃气,港区内以及用于国防科研生产的危险化学品生产装置和储存设施。

2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件,仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB 18218 危险化学品重大危险源辨识

GB 36894 危险化学品生产装置和储存设施风险基准

GB 50089—2018 民用爆炸物品工程设计安全标准

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

爆炸物 explosive

列入《危险化学品目录》及《危险化学品分类信息表》的所有爆炸物。

3.2

有毒气体 toxic gas

列入《危险化学品目录》及《危险化学品分类信息表》,危害特性类别包含急性毒性-吸入的气体。

3.3

易燃气体 flammable gas

列入《危险化学品目录》及《危险化学品分类信息表》,危害特性类别包含易燃气体,类别 1、类别 2 的气体。

3.4

外部安全防护距离 external safety distance

为了预防和减缓危险化学品生产装置和储存设施潜在事故(火灾、爆炸和中毒等)对厂外防护目标的影响,在装置和设施与防护目标之间设置的距离或风险控制线。

3.5

点火源 ignition source

促使可燃物与助燃物发生燃烧的初始能量来源,包括明火、化学反应热、热辐射、高温表面、摩擦和撞击等。

4 外部安全防护距离确定流程

4.1 危险化学品生产装置和储存设施确定外部安全防护距离的流程见图 1。

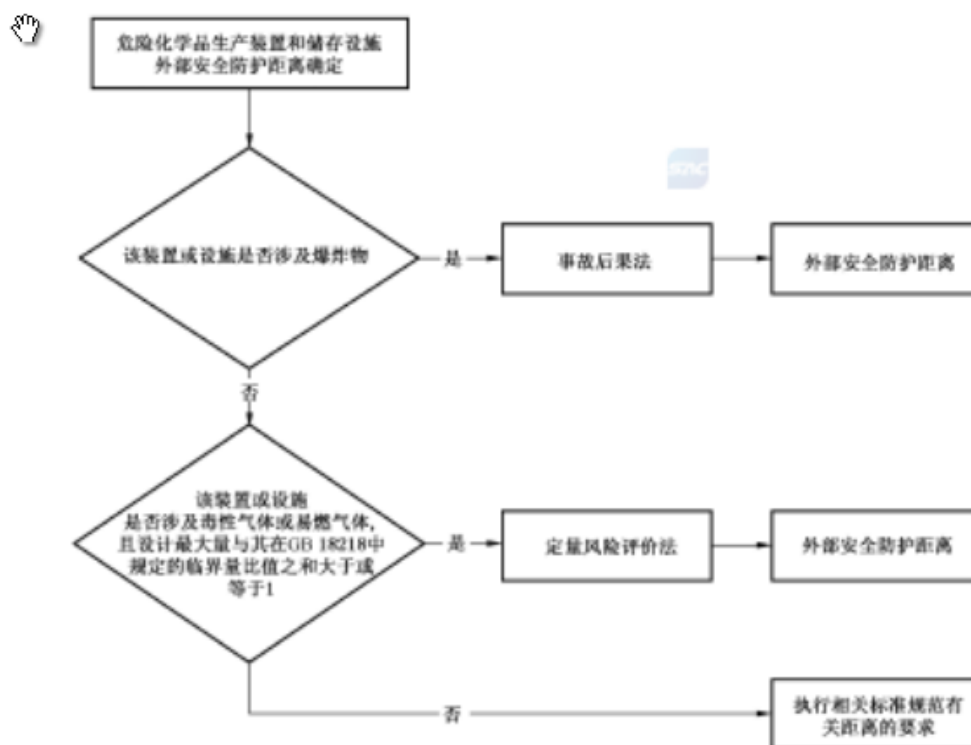


图 1 危险化学品生产装置和储存设施外部安全防护距离确定流程

4.2 涉及爆炸物的危险化学品生产装置和储存设施应采用事故后果法确定外部安全防护距离。

4.3 涉及有毒气体或易燃气体,且其设计最大量与 GB 18218 中规定的临界量比值之和大于或等于 1 的危险化学品生产装置和储存设施应采用定量风险评价方法确定外部安全防护距离。当企业存在上述装置和设施时,应将企业内所有的危险化学品生产装置和储存设施作为一个整体进行定量风险评估,确定外部安全防护距离。

4.4 本标准 4.2 及 4.3 规定以外的危险化学品生产装置和储存设施的外部安全防护距离应满足相关标准规范的距离要求。

5 事故后果法

5.1 计算程序

事故后果法确定外部安全防护距离的流程见图 2。

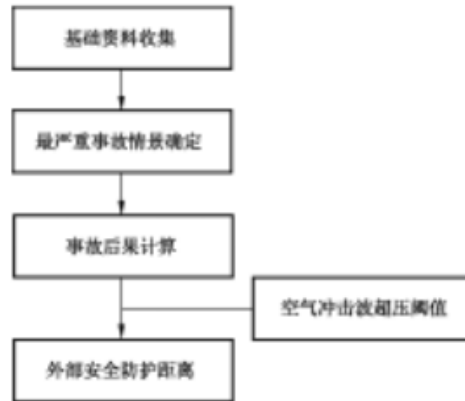


图 2 事故后果法确定外部安全防护距离流程

5.2 基础资料收集

5.2.1 与爆炸物有关的工艺过程资料,包括爆炸物资料、装置和设施平面布置图、工艺过程描述等。

5.2.2 装置和设施外部可能受到事故影响的周边情况,包括周边土地使用状况、地形状况、居民与人口分布统计资料等。

5.3 最严重事故情景确定

5.3.1 辨识生产装置和储存设施中涉及爆炸物的单元,参照 GB 50089—2018 规定,确定该装置和设施内能够发生同时爆炸的最大爆炸物数量,并将该数量爆炸物同时发生爆炸的情景作为最严重事故情景。

5.3.2 当硝酸铵独立储存时,可不考虑其发生爆炸的事故情景。装置或设施中硝酸铵在极端条件下,容易受到周边其他可燃物、易燃物、爆炸物或禁忌物品影响时,应考虑其发生爆炸的事故情景,并将硝酸铵存量的一半计入该装置或设施能够发生同时爆炸的最大爆炸物数量。

5.4 外部安全防护距离确定

5.4.1 根据最严重事故情景以及表 1 给出的空气冲击波超压安全阈值,按式(1)计算外部安全防护距离:

$$\Delta p = 14 \frac{Q}{R^3} + 4.3 \frac{Q^{2/3}}{R^2} + 1.1 \frac{Q^{1/3}}{R} \dots\dots\dots(1)$$

式中:

- Δp ——空气冲击波超压值,单位为 10^5 帕斯卡(Pa);
- Q ——一次爆炸的梯恩梯炸药当量,单位为千克(kg);
- R ——爆炸点距防护目标的距离,单位为米(m)。

表 1 不同类型防护目标的空气冲击波超压阈值 单位为帕斯卡

防护目标(类别按照 GB 36894 划分)	空气冲击波超压阈值*
高敏感防护目标、重要防护目标 一般防护目标中的一类防护目标	2 000
一般防护目标中的二类防护目标	5 000

表 1 (续)

单位为帕斯卡

防护目标(类别按照 GB 36894 划分)	空气冲击波超压阈值 ^a
一般防护目标中的三类防护目标	9 000
^a 2 000 Pa 阈值为对建筑物基本无破坏的上限;5 000 Pa 阈值为对建筑物造成次轻度破坏(2 000 Pa~9 000 Pa)的中等偏下,有可能造成玻璃全部破碎,瓦屋面少量移动,内墙面抹灰少量掉落;9 000 Pa 阈值为造成建筑物次轻度破坏(2 000 Pa~9 000 Pa)的上限,有可能造成房屋建筑物部分破坏不能居住,钢结构的建筑轻微变形,对钢筋混凝土柱无损坏;以上阈值基本不会对室外人员造成直接死亡。	

5.4.2 因地形条件对外部安全防护距离造成的影响可参照 GB 50089—2018 附录 A,对计算得到的外部安全防护距离进行调整。

5.4.3 外部安全防护距离的起点为装置和设施最外侧设备外缘或建筑物的最外轴线,止点为防护目标处建筑物的外墙。

6 定量风险评价法

6.1 计算程序

定量风险评价法确定外部安全防护距离的计算流程见图 3,包括以下步骤:

- a) 收集资料数据;
- b) 确定评估单元;
- c) 危险识别和泄漏场景辨识;
- d) 分析事故概率;
- e) 分析事故后果;
- f) 定量风险计算;
- g) 确定外部安全防护距离。

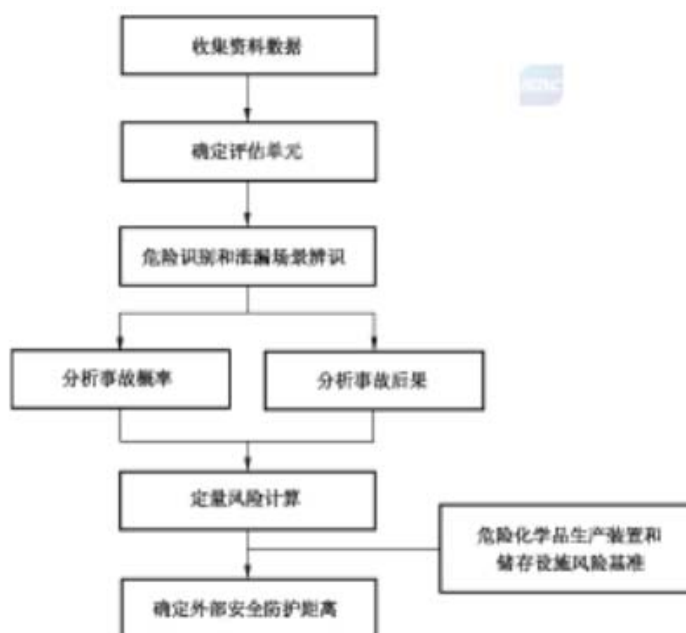


图 3 定量风险评价法计算流程

6.2 资料数据收集

6.2.1 一般资料数据

根据评估单元的范围确定所需收集的资料数据,包括但不限于表2所列的资料数据。

表2 定量风险评价收集的一般资料数据

类别	一般资料数据
危害信息	危险化学品存量、化学品安全技术说明书(Safety Data Sheet, SDS)、现有的工艺危害分析(如危险与可操作性分析)结果、点火源等
设计和运行数据	设计说明、平面布置图、工艺技术规范、安全操作规程、工艺流程图(Process Flow Diagram, PFD)、管道和仪表流程图(Piping & Instrument Diagram, P&ID)、设备数据、管道数据、运行数据等
减缓控制系统	探测和切断系统(可燃气体和有毒气体探测、火焰探测、电视监控、联锁切断等)、消防、水幕等减缓控制系统
管理系统	管理制度、操作和维护手册、应急、事故调查、承包商管理、机械完整性管理、变更和作业程序等
自然条件	大气参数(气压、温度、湿度等)、风向、风速及大气稳定度联合频率; 现场周边地形、现场建筑物等
历史数据	事故案例、设备失效统计资料等
人口数据	企业厂区内、厂区外的人口分布

6.2.2 人口数据统计原则

6.2.2.1 遵循以下原则开展人口分布统计:

- 根据装置事故状态下可能影响的最大范围,确定人口统计的地域边界;
- 考虑人员分布在白天和夜间的区别;
- 考虑娱乐场所、体育馆等敏感场所人员的流动性;

6.2.2.2 对人口数据可采用实地统计数据,也可采用通过政府主管部门、地理信息系统等途径获得的数据。

6.2.3 点火源统计原则

6.2.3.1 典型点火源分为:

- 点源,如加热炉(锅炉)、车辆、火炬、人员等;
- 线源,如公路、铁路、输电线路等;
- 面源,如厂区外的化工厂、冶炼厂等。

6.2.3.2 应对评估单元的工艺条件、装置设施、平面布置等进行分析,结合现场调研,根据事故状态下可能影响的最大范围辨识潜在点火源,并统计点火源的名称、种类、方位、数目以及出现的概率等要素。

6.3 确定评估单元

6.3.1 根据评价目的,可对辨识出的所有危险单元开展定量风险评价;也可对辨识出的危险单元进行初步评价,然后选择能代表评价对象风险水平的单元开展定量风险评价。

6.3.2 评估单元的选择可采用如下方法:

- 危险度评价法(参见附录A);
- 设备选择数法(参见附录B);

c) 其他方法。

6.4 危险识别和泄漏场景辨识

6.4.1 应根据评价对象的具体情况进行系统的危险识别,识别系统中可能对人造成急性伤亡或对物造成突发性损坏的危险,确定其存在的部位、方式以及发生作用的途径和变化规律。

6.4.2 危险识别可采用如下方法:

- a) 系统危险识别方法,如安全检查表法(Checklist)、故障假设分析法(What-if)、危险与可操作性分析法(Hazard and Operability Analysis, HAZOP)、故障类型和影响分析法(Failure Mode and Effect Analysis, FMEA)、故障树分析法(Fault Tree Analysis, FTA)等;
- b) 重大危险源辨识;
- c) 其他危险识别方法,如事故案例分析等。

6.4.3 对泄漏场景的设定应同时满足以下两个条件:

- a) 泄漏发生的频率 $\geq 10^{-8}$ 次/年;
- b) 至少导致1%的致死概率。

6.4.4 泄漏场景根据泄漏孔径大小可分为完全破裂和孔泄漏两大类,各泄漏孔径的取值范围和代表值见表3。当设备直径小于150 mm时,取小于设备直径的孔泄漏场景以及完全破裂场景。

表3 泄漏孔径取值

单位为毫米

泄漏场景	范围	代表值
小孔泄漏	0~5	5
中孔泄漏	5~50	25
大孔泄漏	50~150	100
完全破裂	>150	1)设备(设施)完全破裂或泄漏孔径>150; 2)全部存量瞬时释放

6.4.5 泄漏场景的选择应考虑设备(设施)的工艺条件、历史事故和实际运行环境,宜采用表4定义的典型泄漏场景。

表4 设备(设施)典型泄漏场景

序号	设备(设施)种类	泄漏事件
1	管道	见6.4.6、6.4.7
2	固定的带压容器和储罐	见6.4.8
3	固定的常压容器和储罐	见6.4.9
4	泵和压缩机	见6.4.10
5	换热器	见6.4.11
6	压力释放装置	见6.4.12
7	仓库	见6.4.13
8	铁路槽车或汽车槽车	见6.4.14

6.4.6 管道泄漏场景见6.4.4,对于完全破裂场景,如果泄漏位置严重影响泄漏量或泄漏后果,应至少分别考虑以下三个位置的完全破裂:

- a) 管道上游；
- b) 管道中游；
- c) 管道下游。

6.4.7 对于长管线,应沿管线选择一系列泄漏点,泄漏点的初始间距可取为 50 m,泄漏点数应确保当增加泄漏点数量时,风险曲线不会显著变化。

6.4.8 固定的带压容器和储罐分为三类,见表 5,其泄漏场景见 6.4.4。

表 5 固定带压容器和储罐分类

类别	定义	例子
带压容器	内部绝对压力大于 0.1 MPa 储存容器	分液罐、压力储罐等
工艺容器	在容器内,物质发生物理性质变化(如温度或相态)的容器。如果容器仅仅发生液位的变化,则它应作为一个受压容器(不包括具有管程和壳程结构的换热器)	蒸馏塔、过滤器等
反应容器	在容器内物质发生了化学变化的容器。如果在一个容器内发生了物质混合放热,则该容器也应作为一个反应容器	通用反应器、釜式反应器、床式反应器等

6.4.9 当固定的容器或储罐的内部绝对压力小于或等于 0.1 MPa 时,应考虑为常压容器或储罐,常见的常压容器和储罐的泄漏场景见表 6。

表 6 固定的常压容器和储罐的泄漏场景

类别	泄漏到大气中				泄漏到外罐中			
	小孔泄漏	中孔泄漏	大孔泄漏	完全破裂	小孔泄漏	中孔泄漏	大孔泄漏	完全破裂
单防罐	√	√	√	√				
双防罐				√	√	√	√	√
全防罐				√				
半地下储罐				√	√*			
地下储罐	√*							

* 对于地下储罐的泄漏场景,周围包围介质(如土壤)应考虑为第二级容器(外罐),如果储罐周围的包围介质允许泄漏物质快速蒸发或包围介质可能失效,则应考虑地下储罐的泄漏场景。对于半地下储罐的地下部分,应遵循地下储罐的原则。

6.4.10 泵和压缩机的泄漏场景取吸入管道的泄漏场景,见 6.4.4;当泵或压缩机的吸入管道直径小于 150 mm 时,取小于吸入直径的孔泄漏场景以及完全破裂场景。

6.4.11 换热器的泄漏场景见表 7。

表 7 换热器的泄漏场景

物料位置	泄漏场景			
	泄漏场景 1	泄漏场景 2	泄漏场景 3	泄漏场景 4
危险物质在壳程	5 mm 孔径泄漏	25 mm 孔径泄漏	100 mm 孔径泄漏	破裂

表 7 (续)

物料位置	泄漏场景			
	泄漏场景 1	泄漏场景 2	泄漏场景 3	泄漏场景 4
危险物质在管程, 完程设计压力小于危险物质压力		一条管道中孔泄漏	一条管道破裂	十条管道破裂
危险物质在管程, 完程设计压力大于危险物质压力				十条管道破裂

注: 假设泄漏物质直接泄漏到大气环境中。

6.4.12 若压力释放装置的排放气直接排入大气环境中, 应考虑压力释放装置的泄漏风险, 其泄漏场景可取压力释放装置以最大释放速率进行排放。

6.4.13 仓库应考虑包装单元和仓库整体火灾的可能性, 可取以下三种场景:

- a) 固体包装单元的粉末扩散;
- b) 液体包装单元的存量释放;
- c) 火灾(关注毒性燃烧产物和非火灾燃烧产生的毒性物释放)。

6.4.14 企业内部铁路槽车或汽车槽车的泄漏场景应考虑槽车自身失效引起的泄漏、装卸活动导致的泄漏和外部影响导致的泄漏, 泄漏场景见表 8。

表 8 铁路槽车或汽车槽车的泄漏场景

设备(设施)	泄漏场景
汽车槽车或铁路槽车	场景 1: 孔泄漏, 孔直径等于槽车最大接管直径 场景 2: 槽车破裂
装卸软管	场景 3: 装卸软管中孔泄漏 场景 4: 装卸软管完全破裂
装卸臂	场景 5: 装卸臂中孔泄漏 场景 6: 装卸臂完全破裂
槽车罐下火灾	罐内存量瞬时释放 [*]

^{*} 槽车罐下的火灾可能导致罐内存量瞬时释放, 导致槽车罐下发生火灾的常见原因包括: 槽车周边的火灾或槽车下部的连接部分泄漏后遇到点火源等。

6.5 泄漏频率分析

6.5.1 泄漏频率可使用以下数据来源:

- a) 工业失效数据库;
- b) 企业历史数据;
- c) 供应商的数据;
- d) 基于可靠性的失效概率模型;
- e) 同类设备(设施)典型泄漏场景泄漏频率值参见附录 C 中的表 C.1~表 C.8。

6.5.2 泄漏频率数据选择, 应考虑以下事项:

- a) 使用工业失效数据库时, 应确保泄漏场景与失效数据场景基本假设相一致;

- b) 使用企业历史数据时,应保证该历史数据充足并具有统计意义;
- c) 应谨慎使用供应商提供的数据。

6.6 事故后果分析

6.6.1 源项和气云扩散计算

6.6.1.1 源项和气云扩散的计算,应考虑以下情形:

- a) 泄漏(释放);
- b) 闪蒸和液池蒸发;
- c) 射流和气云扩散;
- d) 火灾;
- e) 爆炸。

6.6.1.2 在选择源项和气云扩散模型时,应考虑泄漏物质的特性。源项和气云扩散的计算模型参见附录D。

6.6.2 泄漏

6.6.2.1 对每一个泄漏场景应选择一个适当的泄漏模型,不同泄漏场景的泄漏速率计算方法参见附录D中的D.1。

6.6.2.2 泄漏位置应根据设备(设施)实际情况而确定。在工艺容器或反应容器中,当容器内同时存在气相和液相时,应模拟气相泄漏和液相泄漏两种场景。

6.6.2.3 泄漏方向应根据设备安装的实际情况确定。如果没有准确的信息,泄漏方向宜设为水平方向,与风向相同。对于地下管道,泄漏方向宜为垂直向上。

6.6.2.4 泄漏一般考虑为无阻挡释放,当同时满足以下两种情况时,宜考虑泄漏位置附近的地面或者物体的阻挡作用:

- a) 对任意的释放方向,存在 L_0/L_j 小于 0.33。 L_0 为泄漏点到阻挡物的距离, L_j 为自由喷射长度,按式(2)计算:

$$L_j = 12 \times u_0 \times b_0 / u_{air} \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中:

- u_0 ——源处的喷射速度,单位为米每秒(m/s);
- b_0 ——源半径,单位为米(m);
- u_{air} ——平均环境风速,单位为米每秒(m/s),通常取 5 m/s。

- b) 对所有可能的释放方向, L_0/L_j 小于 0.33 的概率 P_i 大于 0.5。在这种情况下,频率为 f 的泄漏场景应分成两个独立的泄漏场景:频率 $P_i \times f$ 的有阻挡释放和频率为 $(1-P_i) \times f$ 的无阻挡释放。

6.6.2.5 最大可能泄漏量取 a)和 b)的较小值:

- a) 泄漏设备单元中的物料加上相连设备截断前可流入到泄漏设备单元中的物料,设定流入速度等于泄漏速度;
- b) 泄漏设备及相连单元内所有的物料量。泄漏设备及相连单元内所有的物料量应根据实际运行数据确定。

6.6.2.6 有效泄漏时间的确定应考虑以下因素:

- a) 设备和相连系统中的存量;
- b) 探测和联锁切断时间;
- c) 可能采取的任何反应措施。



6.6.2.7 在确定有效泄漏时间时,应对每个泄漏场景的有效泄漏时间逐个确认,有效泄漏时间可取如下三项中的最小值:

- a) 60 min;
- b) 最大可能泄漏量与泄漏速率的比值;
- c) 基于探测及联锁切断系统等级的泄漏时间,参见附录 E。

6.6.3 闪蒸和液池蒸发

6.6.3.1 过热液体泄漏计算应考虑闪蒸的影响,闪蒸计算参见附录 D 中的 D.2。

6.6.3.2 可形成的液池面积应考虑泄漏量、地面粗糙度、障碍物以及液体收集系统等影响,如果存在围堰、防护堤等拦蓄区,且泄漏的物质不溢出拦蓄区时,液池最大半径为拦蓄区的等效半径。

6.6.4 扩散

6.6.4.1 计算扩散时,应至少考虑以下两种情况:

- a) 射流。对于射流需确定喷射高度或距离;
- b) 大气扩散。大气扩散计算应考虑实际气体特性,根据扩散气体的初始密度、Richardson 数等条件选择重气扩散或非重气扩散。

6.6.4.2 室内的容器、油罐和管道等设备泄漏,应考虑建筑物对扩散的影响,选择模型时应考虑以下情况:

- a) 建筑物不能承受物质泄漏带来的压力,可设定物质直接释放到大气中;
- b) 建筑物可承受物质泄漏带来的压力,则室外扩散源项应考虑建筑物内的源项以及通风系统的影响。

6.6.4.3 在计算扩散时,天气条件宜考虑不同的大气稳定性和风速。当使用 Pasquill 大气稳定度(参见 D.3)时,可选择以下六种天气条件,见表 9。

表 9 选择的天气条件

大气稳定度	风速
B	中风速:3 m/s~5 m/s
D	低风速:1 m/s~2 m/s
D	中风速:3 m/s~5 m/s
D	高风速:8 m/s~9 m/s
E	中风速:3 m/s~5 m/s
F	低风速:1 m/s~2 m/s

6.6.4.4 扩散计算时,应考虑当地的风速、风向及稳定度联合频率,宜选择十六种风向。气象统计资料宜采用评估单元附近气象站的气象统计数据。

6.6.5 火灾和爆炸

6.6.5.1 对于易燃气体或易燃液体泄漏(释放)应考虑发生沸腾液体扩展蒸气云爆炸(Boiling Liquid Expanding Vapor Explosio, BLEVE)和(或)火球、喷射火、池火、蒸气云爆炸及闪火等火灾、爆炸场景。具体场景与物质特性、储存参数、泄漏类型、点火类型等有关,可采用事件树方法确定各种可燃物质释放后,各种事件发生的类型及概率。可燃物质释放后的事件树参见附录 F 中的图 F.1~图 F.5。

6.6.5.2 点火类型分为立即点火和延迟点火。

6.6.5.3 立即点火的点火概率应考虑设备类型、物质种类和泄漏形式(瞬时释放或者连续释放)。可根据数据库统计或通过概率模型计算获得。可燃物质泄漏后立即点火的概率参见 F.2。

6.6.5.4 延迟点火的点火概率应考虑点火源特性、泄漏物特性以及泄漏发生时点火源存在的概率,按式(3)计算:

$$P(t) = P_{\text{present}}(1 - e^{-\omega t}) \quad \dots\dots\dots(3)$$

式中:

$P(t)$ ——0~ t 时间内发生点火的概率;

P_{present} ——点火源存在的概率;

ω ——点火源的点火概率,单位为每秒(s^{-1}),与点火源特性有关;

t ——时间,单位为秒(s)。

点火源的点火概率可根据点火源在某一时间内的点火概率计算得出,常见点火源在 1 min 内的点火概率参见 F.3。

6.6.5.5 压缩液化气体或压缩气体瞬时释放时,应考虑 BLEVE 或火球的影响。BLEVE 或火球热辐射计算参见 D.4.2。

6.6.5.6 可燃有毒物质在点火前应考虑毒性影响,在点火后应考虑燃烧影响。可进行如下简化:

a) 对低活性物质(参见附录 F 中的 F.2),假设不发生点火过程,仅考虑有毒物释放影响;

b) 对中等活性及高活性物质,宜分成可燃物释放和有毒物释放两种独立事件进行考虑。

6.6.5.7 对于喷射火,其方向为物质的实际泄漏方向;如果没有准确的信息,宜考虑垂直方向喷射火和水平方向喷射火,计算方法参见 D.4.3。

6.6.5.8 气云延迟点火发生闪火和爆炸时,可将闪火和爆炸考虑为两个独立的过程。

6.6.5.9 气云爆炸产生的冲击波超压计算宜考虑气云受约束或阻碍的状况,计算方法参见 D.4.4。

6.6.6 减缓控制系统

减缓控制系统应考虑不同种类的减缓控制系统对危险物质释放及其后果的影响。如果能够确定减缓控制系统的效果,宜采用下列步骤反应减缓控制系统的作用:

- a) 确定系统起作用需要的时间;
- b) 确定系统的效果;
- c) 系统起作用前不考虑减缓控制作用;
- d) 系统起作用后的源项值应考虑减缓控制系统的效果并进行修正;
- e) 应考虑减缓控制系统的失效频率。

6.6.7 暴露影响

6.6.7.1 死亡概率计算

6.6.7.1.1 有毒气体、热辐射和超压的影响阈值参见附录 G。

6.6.7.1.2 给定暴露场景下,人员的死亡概率可采用概率函数法计算,死亡概率 P_d 与相应的概率值 P_r 函数关系见式(4)和式(5), P_d 和 P_r 的对应关系参见附录 H 中的 H.1。

$$P_d = 0.5 \times \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{P_r - 5}{\sqrt{2}} \right) \right] \quad \dots\dots\dots(4)$$

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad \dots\dots\dots(5)$$

式中:

t ——暴露时间,单位为秒(s)。

6.6.7.2 中毒

毒性暴露下死亡概率值可按式(6)计算:

$$P_{\tau} = a + b \ln(C^n \times t) \dots\dots\dots (6)$$

式中:

- P_{τ} ——毒性暴露下的死亡概率值;
- a, b, n ——描述物质毒性的常数,参见 H.2;
- C ——暴露浓度,单位为毫克每立方米(mg/m^3);
- t ——暴露于毒物环境中的时间,单位为分(min),最大值为 30 min。

6.6.7.3 热辐射危害

6.6.7.3.1 火球、池火及喷射火的死亡概率值可按式(7)计算:

$$P_{\text{H}} = -36.38 + 2.56 \ln(Q^{4/3} \times t) \dots\dots\dots (7)$$

式中:

- P_{H} ——热辐射暴露下的死亡概率值;
- Q ——热辐射强度,单位为瓦特每平方米(W/m^2);
- t ——暴露时间,单位为秒(s),最大值为 20 s。

6.6.7.3.2 在计算热辐射暴露死亡概率时,处于火球、池火及喷射火火场中或热辐射强度不小于 $37.5 \text{ kW}/\text{m}^2$ 时,人员的死亡概率为 100%。

6.6.7.4 闪火和爆炸

6.6.7.4.1 闪火的火焰区域等于点燃时可燃云团浓度超过燃烧下限的范围。闪火火焰区域内,人员的死亡概率为 100%;闪火火焰区域外,人员的死亡概率为 0。

6.6.7.4.2 对于蒸气云爆炸,在超过 0.03 MPa 超压影响的区域内,人员的死亡概率为 100%;在 0.01 MPa 超压影响区域外,人员的死亡概率为 0。

6.7 定量风险计算

6.7.1 定量风险可用个人风险和社会风险来度量。个人风险可用绘制在标准比例尺地理图上的个人风险等值线表示,个人风险等值线对应的死亡概率不宜小于 10^{-8} 次/年。社会风险可用 $F-N$ 曲线(frequency-number curve)表示。

6.7.2 在计算个人风险和社会风险时,应对评价区域进行计算网格划分。网格单元的划分应考虑当地人口密度和事故影响范围,网格尺寸不应影响计算结果。在确定每个网格单元的人员数量时,可假设网格单元内部有相同的人口密度。将点火概率分配到每一个网格单元,如网格中有多个点火源,应将所有的点火源合并成处于网格单元中心的单个点火源。

6.7.3 当人员处于室外和室内两种情况下时,社会风险可按式(8)进行修正:

$$P_{\text{SR}} = \beta_{\text{SR}} \times P_{\text{a}} \dots\dots\dots (8)$$

式中:

- P_{SR} ——社会风险计算时的人口死亡百分比;
- β_{SR} ——社会风险计算时的人口死亡百分比修正因子,取值参见表 10;
- P_{a} ——人员的死亡概率。

表 10 修正因子 β_{sr} 取值

危害场景		β_{sr}	
		室外	室内
爆炸	爆炸超压 ≥ 0.03 MPa	1	1
	0.01 MPa $<$ 爆炸超压 < 0.03 MPa	注 1	
	爆炸超压 ≤ 0.01 MPa	0	0
闪火范围内		1	1
闪火范围外		0	0
热辐射强度 < 37.5 kW/m ²	火球	0.14 ^a	0
	喷射火	0.14 ^a	0
	池火	0.14 ^a	0
热辐射强度 ≥ 37.5 kW/m ²	火球	1	1
	喷射火	1	1
	池火	1	1
毒性		1	0.1 ^b
注：爆炸超压 0.01 MPa~0.03 MPa 半径区域的室外人员的死亡概率为 0；在计算社会风险时，室内人员需考虑建筑物破坏的影响，死亡百分比为 2.5%。			
^a 当计算社会风险时，通常认为在衣服着火以前，室外人员因受到衣服的保护而减弱了热辐射的影响，与没有衣服保护相比，其死亡百分比减小至 14%，因此修正因子为 0.14。 ^b 计算室内人员的死亡百分比时应考虑室内真实毒性剂量，室内毒性剂量与毒性气团的通过时间和房间通风率有关，在没有具体参数时，可取同样剂量下室外人员死亡概率的 0.1 倍。			

6.7.4 个人风险计算流程见图 4，包括以下步骤：

- 选择一个泄漏场景 (Loss of Containment, LOC)，确定 LOC 的发生频率 f_s 。
- 选择一种天气等级 M 和该天气等级下的一种风向 φ ，给出天气等级 M 和风向 φ 同时出现的联合概率 $P_M \times P_\varphi$ 。
- 如果是可燃物释放，选择一个点火事件 i 并确定点火概率 P_i 。如果考虑物质毒性影响，则不考虑点火事件。
- 计算在特定的 LOC、天气等级 M 、风向 φ 及点火事件 i (针对可燃物) 条件下网格单元上的死亡概率 P_a ，计算中参考高度取 1 m。
- 计算 (LOC、 M 、 φ 、 i) 条件下对网格单元个体风险 (Individual Risk, IR) 的贡献，按式 (9) 计算。

$$\Delta IR_{S,M,\varphi,i} = f_s \times P_M \times P_\varphi \times P_i \times P_a \quad \dots\dots\dots (9)$$

- 对所有的 LOC (f_s)、 M 、 φ 及 i ，重复 a)~e) 步的计算；则网格单元处的个人风险按式 (10) 计算。

$$IR = \sum_S \sum_M \sum_\varphi \sum_i \Delta IR_{S,M,\varphi,i} \quad \dots\dots\dots (10)$$

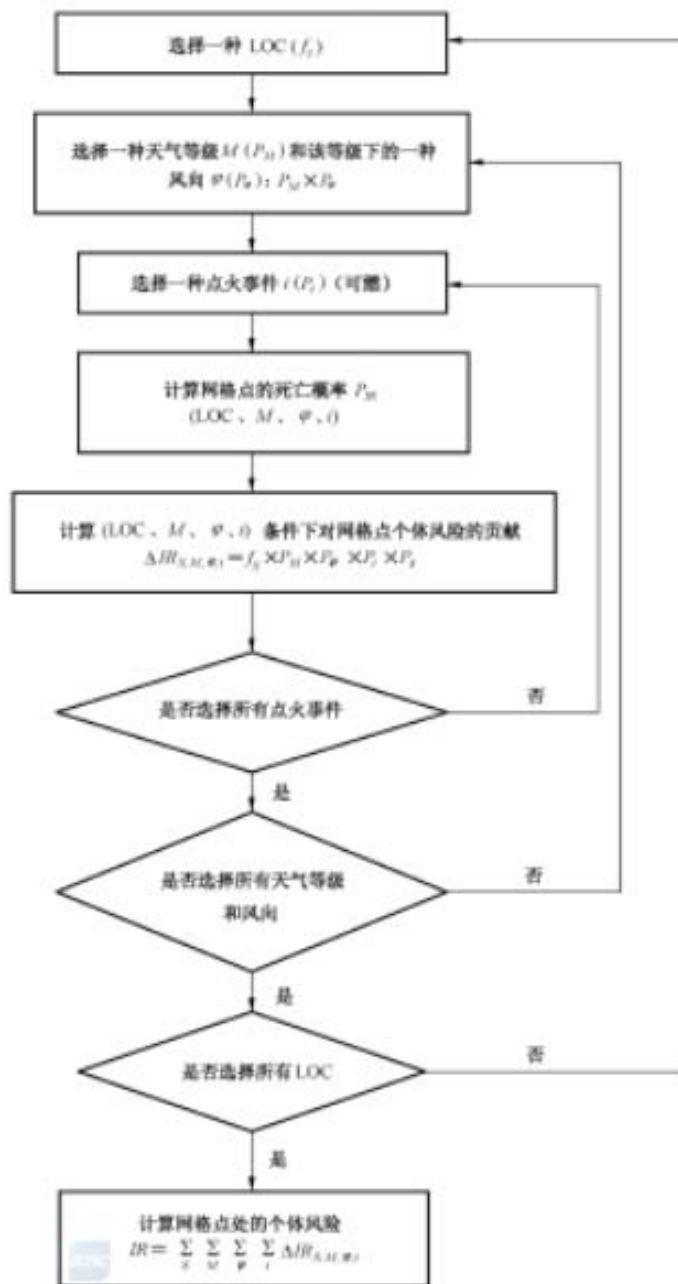


图 4 网格单元的个人风险计算程序

6.7.5 社会风险计算流程见图 5, 包括以下步骤:

- a) 首先确定以下条件:
 - 1) 确定 LOC 及其发生频率 f_s ;
 - 2) 选择天气等级 M , 频率为 P_M ;
 - 3) 选择天气等级 M 下的一种风向 φ , 频率为 P_φ ;
 - 4) 对于可燃物, 选择条件概率为 P_i 的点火事件 i 。
- b) 选择一个网格单元 j , 确定网格单元内的人数 N_{cell} 。

c) 计算在特定的 LOC、M、φ 及 i 下，网格单元 j 内的人口死亡百分比 P_{SRj} ，计算中参考高度取 1 m。

d) 按式(11)计算在特定的 LOC、M、φ 及 i 下的网格单元 j 的死亡人数 $\Delta N_{S,M,\varphi,i,j}$ 。

$$\Delta N_{S,M,\varphi,i,j} = P_{SRj} \times N_{\text{cell}} \quad \dots\dots\dots(11)$$

e) 对所有网格单元，重复 b)~d)步的计算，按式(12)计算在特定的 LOC、M、φ 及 i 下的死亡总人数 $N_{S,M,\varphi,i}$ 。

$$N_{S,M,\varphi,i} = \sum_j \Delta N_{S,M,\varphi,i,j} \quad \dots\dots\dots(12)$$

f) 按式(13)计算 LOC、M、φ 及 i 的联合频率 $f_{S,M,\varphi,i}$ 。

$$f_{S,M,\varphi,i} = f_S \times P_M \times P_\varphi \times P_i \quad \dots\dots\dots(13)$$

对所有的 LOC(f_S)、M、φ 及 i，重复 a)~f)步的计算，按式(14)用累积死亡总人数 $N_{S,M,\varphi,i} \geq N$ 的所有事故发生的频率 $f_{S,M,\varphi,i}$ 构造 F-N 曲线。

$$F_N = \sum_{S,M,\varphi,i} f_{S,M,\varphi,i} \rightarrow N_{S,M,\varphi,i} \geq N \quad \dots\dots\dots(14)$$

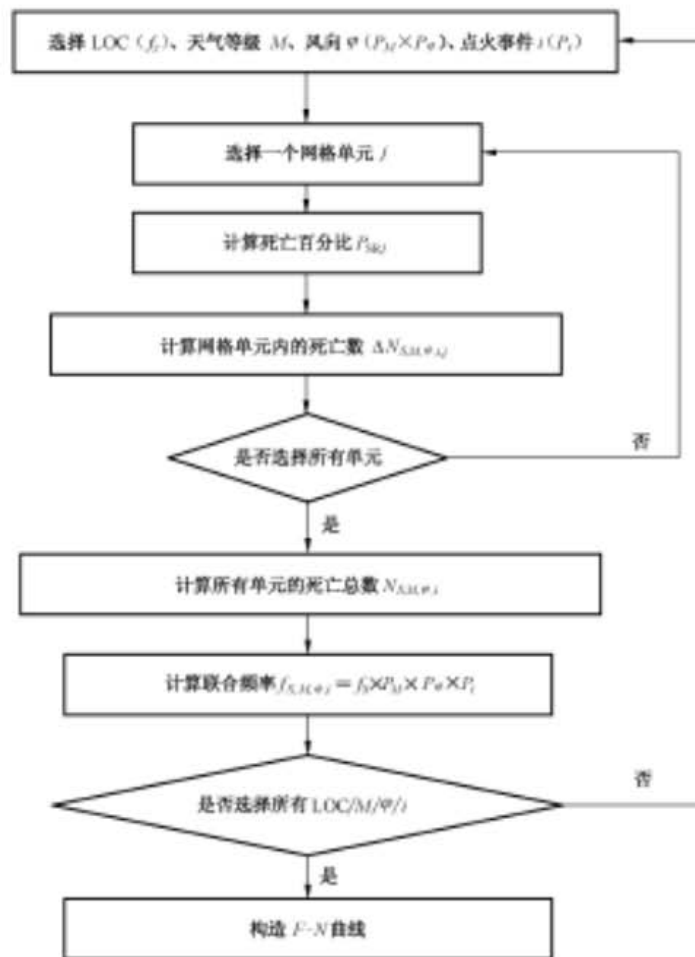


图 5 网格单元的社会风险计算流程

6.8 外部安全防护距离确定

6.8.1 按照 GB 36894 中的个人风险基准,绘制危险化学品生产装置和储存设施周围的风险等值线,确定不同类型防护目标外部安全防护距离是否满足风险基准的要求。

6.8.2 当防护目标为独栋建筑物时,应以建筑物的外墙为边界评定其是否满足个人风险基准的要求,当防护目标为带有配套设施的机构或场所时,应以机构或场所的围墙或用地边界线为边界评定其是否满足个人风险基准的要求。

6.8.3 社会风险基准是在个人风险基准确定的基础上,结合危险化学品生产装置和储存设施周边区域的人口分布,对危险化学品事故引发群死群伤事故的约束。绘制危险化学品生产装置和储存设施的社会风险 $F-N$ 曲线,应按照 GB 36894 中的社会风险基准,判断项目的社会风险水平是否可以接受:

- a) 若社会风险曲线进入不可接受区,则应立即采取安全改进措施降低社会风险;
- b) 若社会风险曲线进入尽可能降低区,需要在可实现的范围内,尽可能采取安全改进措施,降低社会风险;
- c) 若社会风险曲线全部落在可接受区,则该风险可接受。



附录 A

(资料性附录)

评估单元选择方法——危险度评价法

危险度评价法是以各单元的物料、容量、温度、压力和操作等五项指标进行评定,每一项又分为 A、B、C、D 四个类别,分别给定 10 分、5 分、2 分、0 分,最后根据这些分值之和来评定该单元的危险程度等级。危险度评价取值表见表 A.1。

表 A.1 危险度评价取值表

工程	分值			
	A(10分)	B(5分)	C(2分)	D(0分)
物质(系指单元中危险、有害程度最大的物质)	1.甲类可燃气体 ^a ; 2.甲 A 类物质及液态烃类; 3.甲类固体; 4.极度危害物质 ^b	1.乙类可燃气体; 2.甲 B、乙 A 类可燃液体; 3.乙类固体; 4.高度危害物质	1.乙 B、丙 A、丙 B 类可燃液体; 2.丙类可燃固体; 3.中、轻度危害物质	不属于左述之 A、B、C 项的物质
容量 ^c	1.气体在 1 000 m ³ 以上; 2.液体在 100 m ³ 以上	1.气体在 500 m ³ ~ 1000 m ³ ; 2.液体在 50 m ³ ~ 100 m ³	1.气体在 100 m ³ ~ 500 m ³ ; 2.液体在 10 m ³ ~ 50 m ³	1.气体 < 100 m ³ ; 2.液体 < 10 m ³
温度	1 000 ℃ 以上使用,其操作温度在燃点以上	1.1 000 ℃ 以上使用,但操作温度在燃点以下; 2.在 250 ℃ ~ 1 000 ℃ 使用,其操作温度在燃点以上	1.在 250 ℃ ~ 1 000 ℃ 使用,其操作温度在燃点以下; 2.在低于 250 ℃ 时使用,操作温度在燃点以上	在低于 250 ℃ 时使用,操作温度在燃点以下
压力	100 MPa	20 MPa~100 MPa	1 MPa~20 MPa	1 MPa 以下
操作	1.临界放热和特别剧烈的放热反应操作; 2.在爆炸极限范围内或其附近操作	1.中等放热反应(如烷基化、酯化、加成、氧化、聚合、缩合等反应)操作; 2.系统进入空气或不纯物质,可能发生危险的操作; 3.使用粉状或雾状物质,有可能发生粉尘爆炸的操作; 4.单批式操作	1.轻微放热反应(如加氢、水合、异构化、磺化、中和等反应)操作; 2.在精制过程中伴有化学反应; 3.单批式操作,但开始使用机械等手段进行程序操作; 4.有一定危险的操作	无危险的操作

^a 见 GB 50160 中可燃物质的火灾危险性分类。
^b 见 HG/T 20660 表 1、表 2、表 3。
^c (1)有触媒的反应,应去掉触媒所占空间;(2)气液混合反应,应按其反应的相态选择上述规定。

危险度分级见表 A.2。

表 A.2 危险度分级

总分值	≥16 分	11 分~15 分	≤10 分
等级	I	II	III
危险程度	高度危险	中度危险	低度危险

可选择总分值≥11 分的单元(装置)进行风险评价。

附录 B

(资料性附录)

评估单元选择方法——设备选择数法

B.1 流程

选择数法是根据单元中危险物质的量和工艺条件,来表征该单元的相对危险性,流程示意图见图 B.1,具体步骤如下:

- a) 将企业划分为独立的单元;
- b) 计算单元的指示数 A ,它表征了单元的固有危险, $A = f(\text{危险物质的质量,工艺条件,物质属性})$;
- c) 计算单元对企业周边系列点上造成的危险。该点的危险用选择数 S 来表征,它是指示数 A 和该点与装置的距离 L 的函数, $S = f(A, L)$;
- d) 根据选择数 S 的相对大小,选择需进行定量风险评价的单元。

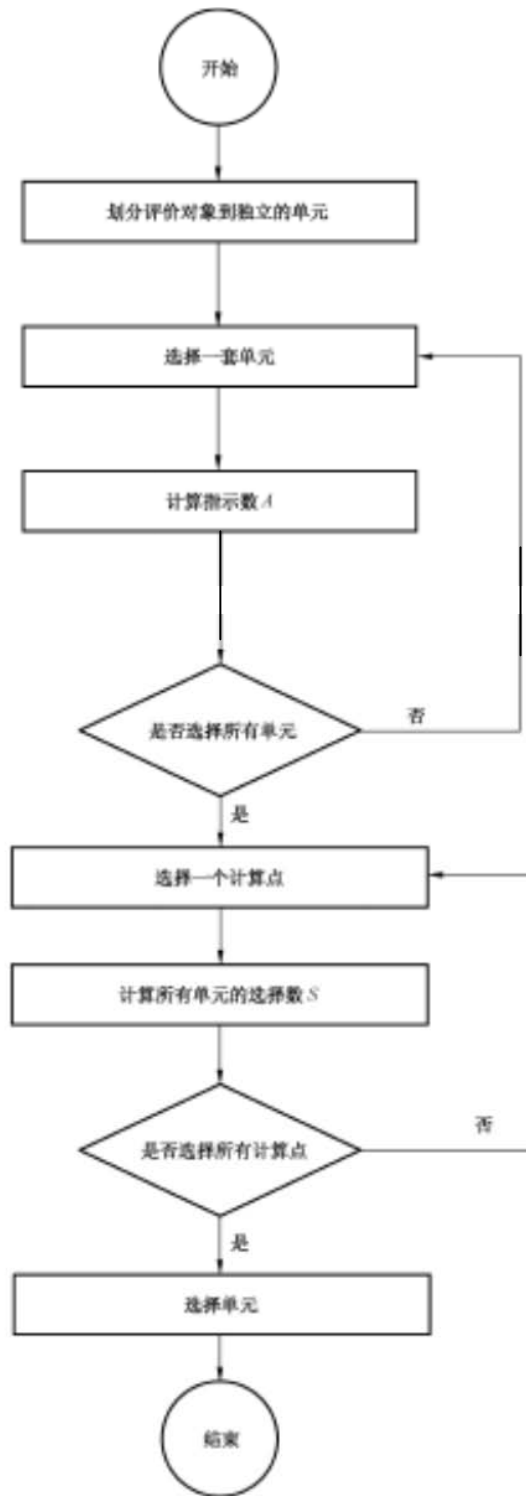


图 B.1 设备选择数法流程示意图

B.2 划分单元

划分单元的主要原则如下：

- a) “独立单元”是指该单元内物质的泄漏不会导致相邻其他单元的物质大量释放。如果事故发生时,两个单元能够在非常短的时间内切断,则它们可划分为相互独立的单元。
- b) 区分工艺单元和储存单元。对于储存单元,如储罐,即使储罐包含循环系统和热交换系统,它仍将作为一个独立的储存单元对待。

B.3 计算指数 A

B.3.1 指数 A 计算公式

指数 A 为无因次量,表征了单元的固有危险,按式(B.1)计算。

$$A = f(Q, Q_1, Q_2, Q_3, G) = \frac{Q \times Q_1 \times Q_2 \times Q_3}{G} \dots\dots\dots (B.1)$$

式中:

- Q ——单元中物质的质量,单位为千克(kg);
- Q₁ ——工艺条件因子,用以表征单元的类型,即工艺单元或储存单元;
- Q₂ ——工艺条件因子,用以表征单元的布局以及防止物质扩散到环境的措施;
- Q₃ ——工艺条件因子,用以表征单元中物质释放后,气相物质的量(基于单元的工艺温度、物质常压沸点、物质的相态和环境温度);工艺条件因子只适用于有毒物质和可燃物质,对于爆炸物质(炸药、火药等),Q₁=Q₂=Q₃=1,则 A=Q/G;
- G ——阈值,它表征了物质的危险度,由物质的物理属性和毒性、燃烧爆炸性所决定。

B.3.2 因子 Q₁、Q₂、Q₃取值

B.3.2.1 工艺条件因子 Q₁

Q₁的取值见表 B.1。

表 B.1 Q₁取值一览表

单元类型	Q ₁
工艺单元	1
储存单元	0.1

B.3.2.2 工艺条件因子 Q₂

Q₂的取值见表 B.2。

表 B.2 Q₂取值一览表

单元的布置和防护措施	Q ₂
室外单元	1.0
封闭式单元	0.1

表 B.2 (续)

单元的布置和防护措施	Q_2
单元有围堰,工艺温度 $T_p \leq$ 沸点 $T_{bp} + 5\text{ }^\circ\text{C}$	1
单元有围堰,工艺温度 $T_p >$ 沸点 $T_{bp} + 5\text{ }^\circ\text{C}$	0.1

注 1: 对于储存单元,工艺温度可视为储存温度。
 注 2: 封闭式单元能阻止物质泄漏时扩散到环境中。但要求封闭设施能承受装置物质瞬时释放的物理压力,能极大地降低物质直接释放到环境中。如果封闭设施能够使释放到大气环境中的物质数量降低 5 倍以上,或者能够将释放物导向安全地点,那么这样的单元可以考虑为封闭的,否则应该作为一个室外单元。
 注 3: 围堰能阻止物质扩散到环境中。对于能够容纳液体,并能承受载荷的双层封闭设施,可作为围堰考虑,如双防常压罐、全防常压储罐、地下常压罐和半地下常压罐。

B.3.2.3 工艺条件因子 Q_3

工艺条件因子 Q_3 取值见表 B.3。

表 B.3 Q_3 取值一览表

物质相态	Q_3
物质为气态	10
物质为液态	
① 工艺温度下饱和蒸汽压 $\geq 3 \times 10^5\text{ Pa}$	10
② $1 \times 10^5\text{ Pa} \leq$ 工艺温度下饱和蒸汽压 $< 3 \times 10^5\text{ Pa}$	$X + \Delta$
③ 工艺温度下饱和蒸汽压 $< 1 \times 10^5\text{ Pa}$	$P_i + \Delta$
物质为固态	0.1

注 1: 表中压力为绝对压力。
 注 2: $X = 45 \times P_{\text{sat}} - 3.5$, P_{sat} 为饱和蒸汽压 (MPa), P_i 为工艺温度下物质的蒸汽分压。
 注 3: Δ 表征环境与液池之间的热传导导致的液池蒸发增量。 Δ 由常压沸点 T_{bp} 决定, Δ 取值见表 B.4。对危险物质混合物应该使用 10% 蒸馏温度点作为常压沸点,即在此温度下混合物的 10% 被蒸馏掉。
 注 4: 对于溶解在非危险性溶剂里的危险物质,应使用工艺温度下饱和蒸汽压中的危险物质的分压。
 注 5: $0.1 \leq Q_3 \leq 10$ 。

表 B.4 Δ 取值一览表

T_{bp}	Δ
$-25\text{ }^\circ\text{C} \leq T_{bp}$	0
$-75\text{ }^\circ\text{C} \leq T_{bp} < -25\text{ }^\circ\text{C}$	1
$-125\text{ }^\circ\text{C} \leq T_{bp} < -75\text{ }^\circ\text{C}$	2
$T_{bp} < -125\text{ }^\circ\text{C}$	3

B.3.3 阈值 G

B.3.3.1 有毒物质的阈值

有毒物质的阈值由致死浓度 LC_{50} (老鼠吸入 1 h 半数死亡的浓度) 和 25 °C 下物质的相态决定, 取值见表 B.5。

表 B.5 有毒物质阈值表

LC_{50} mg/m ³	25 °C 时物质的相态	阈值 G kg
$LC \leq 100$	气相	3
	液相(L)	10
	液相(M)	30
	液相(H)	100
	固态	300
$100 < LC \leq 500$	气相	30
	液相(L)	100
	液相(M)	300
	液相(H)	1 000
	固态	3 000
$500 < LC \leq 2\ 000$	气相	300
	液相(L)	1 000
	液相(M)	3 000
	液相(H)	10 000
	固态	∞
$2\ 000 < LC \leq 20\ 000$	气相	3 000
	液相(L)	10 000
	液相(M)	∞
	液相(H)	∞
	固态	∞
$LC > 20\ 000$	所有相	∞

注 1: 液相(L)表示, 25 °C < 物质常压沸点 \leq 50 °C;

注 2: 液相(M)表示, 50 °C < 物质常压沸点 \leq 100 °C;

注 3: 液相(H)表示, 物质常压沸点 > 100 °C。

B.3.3.2 可燃物的阈值

可燃物是指在系统中, 工艺温度不小于其闪点的可燃物质。可燃物的阈值 $G = 1 \times 10^4$ kg。

B.3.3.3 爆炸物质的阈值

爆炸物质的阈值等于 1 000 kg TNT 当量的爆炸物的质量。

B.3.4 计算单元的指示数 A

对于单元中物质 i 的指示数 A_i ,按式(B.2)计算。

$$A_i = \frac{Q_i \times Q_1 \times Q_2 \times Q_3}{G_i} \dots\dots\dots(B.2)$$

式中:

Q_i ——单元中物质 i 的质量,单位为千克(kg);

G_i ——物质 i 的阈值,单位为千克(kg)。

如果单元中出现多种物质和工艺条件,则必须对每种物质和每种工艺条件进行计算,计算时应将物质划分为可燃物、有毒物质和爆炸物质三类,分别计算可燃指示数 A^F ,毒性指示数 A^T 和爆炸指示数 A^E ,按式(B.3)~式(B.5)。

$$A^T = \sum_{i,P} A_{i,P} \dots\dots\dots(B.3)$$

$$A^F = \sum_{i,P} A_{i,P} \dots\dots\dots(B.4)$$

$$A^E = \sum_{i,P} A_{i,P} \dots\dots\dots(B.5)$$

上式中 i 表示各类物质, P 表示工艺条件。一个单元可能有三个不同的指示数。此外,如该物质既属于可燃物又有毒性,则应分别计算该物质的 A^T, A^F 。

B.4 计算选择数 S

选择数 S ,按式(B.6)~式(B.8)计算:

$$\text{有毒物质} \quad S^T = \left(\frac{100}{L}\right)^2 A^T \dots\dots\dots(B.6)$$

$$\text{可燃物质} \quad S^F = \left(\frac{100}{L}\right)^3 A^F \dots\dots\dots(B.7)$$

$$\text{爆炸物质} \quad S^E = \left(\frac{100}{L}\right)^3 A^E \dots\dots\dots(B.8)$$

式中 L 表示计算点离单元的实际距离,单位为米(m),最小值为 100 m。

对于每个单元,应至少在企业边界上选择 8 个计算点进行选择数计算。相邻两点的距离不能超过 50 m。除计算企业的边界上的选择数外,对于最靠近装置的、已存在的或计划修建的社区,也应计算选择数 S 。

B.5 选择单元

如果满足下列条件之一的单元,则应进行定量风险评价:

- a) 对于企业边界上某点,该单元的选择数较大,并大于该点最大选择数的 50%;
- b) 某单元对附近已存在或计划修建的社区的选择数大于其他单元的选择数;
- c) 有毒物质单元的选择数与最大的选择数处于同一数量级。

附录 C

(资料性附录)

同类设备(设施)典型泄漏场景泄漏频率值

同类设备(设施)典型泄漏场景泄漏频率值参见表 C.1~表 C.8。

表 C.1 管道泄漏频率值

管道直径 mm	泄漏频率 每米每年			
	小孔泄漏	中孔泄漏	大孔泄漏	完全破裂
20	3×10^{-5}	—	—	1×10^{-6}
25	2×10^{-5}	—	—	2×10^{-6}
50	1×10^{-5}	—	—	2×10^{-6}
100	3×10^{-4}	2×10^{-4}	—	2×10^{-7}
150	1×10^{-4}	1×10^{-4}	—	3×10^{-7}
200	1×10^{-4}	1×10^{-4}	3×10^{-7}	7×10^{-8}
250	7×10^{-7}	1×10^{-4}	3×10^{-7}	7×10^{-8}
300	3×10^{-7}	1×10^{-4}	1×10^{-7}	7×10^{-8}
400	3×10^{-7}	7×10^{-7}	7×10^{-8}	7×10^{-8}
>400	2×10^{-7}	7×10^{-7}	7×10^{-8}	3×10^{-8}

表 C.2 固定的带压容器和储罐泄漏频率值

单位为每年

设备类型	泄漏频率			
	小孔泄漏	中孔泄漏	大孔泄漏	完全破裂
带压容器	4×10^{-5}	1×10^{-4}	1×10^{-5}	6×10^{-6}
工艺容器-塔器	8×10^{-5}	2×10^{-4}	2×10^{-5}	6×10^{-6}
工艺容器-过滤器	9×10^{-4}	1×10^{-4}	5×10^{-5}	1×10^{-5}
反应容器	1×10^{-4}	3×10^{-4}	3×10^{-5}	2×10^{-6}

表 C.3 固定的常压容器和储罐泄漏频率值

单位为每年

设备类型	泄漏到大气中				泄漏到外罐中			
	小孔 泄漏	中孔 泄漏	大孔 泄漏	完全 破裂	小孔 泄漏	中孔 泄漏	大孔 泄漏	完全 破裂
单防罐	4×10^{-5}	1×10^{-4}	1×10^{-5}	2×10^{-5}	—	—	—	—
双防罐	—	—	—	1.2×10^{-8}	1×10^{-4}	1×10^{-5}	1×10^{-7}	5×10^{-8}
全防罐	—	—	—	1×10^{-8}	—	—	—	—
半地下储罐	—	—	—	1×10^{-8}	—			
地下储罐	—							

表 C.4 泵和压缩机泄漏频率值

单位为每年

设备类型	泄漏频率			
	小孔泄漏	中孔泄漏	大孔泄漏	完全破裂
单密封离心泵	6×10^{-2}	5×10^{-4}	1×10^{-4}	—
双密封离心泵	6×10^{-3}	5×10^{-4}	1×10^{-4}	—
离心压缩机	—	1×10^{-3}	1×10^{-4}	—
往复式压缩机	—	6×10^{-3}	6×10^{-4}	—

表 C.5 换热器的泄漏频率值

单位为每年

物料位置	泄漏场景			
	泄漏场景 1	泄漏场景 2	泄漏场景 3	泄漏场景 4
危险物质在壳程	4×10^{-5}	1×10^{-4}	1×10^{-5}	6×10^{-4}
危险物质在管程,壳程设计 压力小于危险物质压力	—	1×10^{-2}	1×10^{-3}	1×10^{-5}
危险物质在管程,壳程设计 压力大于危险物质压力	—	—	—	1×10^{-4}

表 C.6 压力泄放装置泄漏频率值

单位为每年

设备类型	泄漏频率
压力释放装置	2×10^{-5}

表 C.7 仓库三种场景对应频率值

设施场所	场景 1 每次处理包装单元	场景 2 每次处理包装单元	场景 3 每年
包装单元和仓库	1×10^{-5}	1×10^{-5}	5×10^{-4}

注：场景 1 和场景 2 应结合包装单元和仓库的年处理包装单元次数，折算场景对应的年频率。

表 C.8 铁路槽车或汽车槽车泄漏场景对应频率值

槽车类型	槽车自身		装卸软管		装卸臂	
	场景 1 每年	场景 2 每年	场景 3 每小时	场景 4 每小时	场景 5 每小时	场景 6 每小时
压力槽车	5×10^{-7}	5×10^{-7}	4×10^{-5}	4×10^{-6}	3×10^{-7}	3×10^{-8}
常压槽车	5×10^{-7}	1×10^{-5}	4×10^{-5}	4×10^{-6}	3×10^{-7}	3×10^{-8}

注：场景 3、4、5、6 应结合实际装卸作业的年时长，折算场景对应的年频率。槽车下部的连接部分泄漏后被点燃形成的火灾，通常只发生在装载可燃物质的槽车，压力储存槽车对应频率值通常取 1×10^{-8} ，常压储存槽车对应频率值通常取 1×10^{-5} 。槽车周边的火灾通常发生在周边储罐发生泄漏后被点燃，对应的频率值应结合周边泄漏事故发生进行确定。

附录 D
(资料性附录)
源项和气云扩散计算

D.1 泄漏速率计算**D.1.1 液体经管道上的孔流出**

质量流率可按式(D.1)计算:

$$Q_m = AC_o \sqrt{2\rho(p - p_o)} \quad \dots\dots\dots(D.1)$$

式中:

- Q_m ——质量流率,单位为千克每秒(kg/s);
- A ——泄漏孔面积,单位为平方米(m^2);
- C_o ——液体泄漏系数;
- p ——管道内液体压力,单位为帕斯卡(Pa);
- ρ ——泄漏液体密度,单位为千克每立方米(kg/m^3);
- p_o ——环境压力,单位为帕斯卡(Pa)。

液体泄漏系数 C_o 是雷诺数和孔直径的函数,经验数据如下:

- a) 对于锋利的孔和雷诺数大于 30 000 时,液体泄漏系数近似取 0.61。对于这种情况,液体的流出速率不依赖于裂口的尺寸。
- b) 对于圆滑喷嘴,液体泄漏系数可近似取 1。
- c) 对于与容器相连的管嘴(即长度与直径之比不小于 3),液体泄漏系数近似取 0.81。
- d) 当液体泄漏系数不知道或不能确定时,取 1.0 使所计算的流量最大。

D.1.2 液体经储罐上的孔流出

瞬时质量流率可按式(D.2)计算:

$$Q_m = \rho AC_o \sqrt{2\left(\frac{p - p_o}{\rho} + gh_L\right)} \quad \dots\dots\dots(D.2)$$

式中:

- Q_m ——质量流率,单位为千克每秒(kg/s);
- p ——储罐内液体压力,单位为帕斯卡(Pa);
- p_o ——环境压力,单位为帕斯卡(Pa);
- C_o ——液体泄漏系数;
- g ——重力加速度,取 $9.8 m/s^2$;
- A ——泄漏孔面积,单位为平方米(m^2);
- ρ ——液体密度,单位为千克每立方米(kg/m^3);
- h_L ——泄漏孔上方液体高度,单位为米(m)。

D.1.3 液体管道断裂

不可压缩液体在管道中流动,能量式可按式(D.3)计算:

$$\frac{\Delta p}{\rho} + \frac{\Delta \bar{u}^2}{2\alpha} + g \Delta Z + F = -\frac{W_s}{m} \quad \dots\dots\dots(D.3)$$

式中:

- Δp ——管道两端压力差,单位为帕斯卡(Pa);
- ρ ——液体密度,单位为千克每立方米(kg/m^3);
- \bar{v} ——液体平均瞬时流速,单位为米每秒(m/s);
- α ——无量纲速率轮廓修正系数,其取值为:对于层流, α 取0.5;对于湍流, α 取1.0;
- g ——重力加速度,单位为米每二次方秒(m/s^2);
- ΔZ ——终止状态减去初始状态的高度差,单位为米(m);
- F ——摩擦导致的机械能损失,包括来自流经管道长度的摩擦损失,适用于诸如阀门、弯头、孔、管道的进口和出口,单位为米牛顿每千克($\text{m} \cdot \text{N}/\text{kg}$);
- W_s ——轴功,单位为帕斯卡米($\text{Pa} \cdot \text{m}$);
- m ——质量流速,单位为千克每秒(kg/s);
- Δ 函数——终止状态减去初始状态。

对于有摩擦阻力的设备,摩擦损失项形式可按式(D.4)计算:

$$F = K_f \left(\frac{u^2}{2} \right) \dots\dots\dots (D.4)$$

式中:

K_f ——管道或管道配件摩擦导致的压差损失(无量纲);

对于流经管道的液体,压差损失项 K_f 可按式(D.5)计算:

$$K_f = \frac{4fL}{d} \dots\dots\dots (D.5)$$

式中:

f ——Fanning(范宁)摩擦系数(无量纲);

L ——管道长度,单位为米(m);

d ——管道内径,单位为米(m)。

Fanning(范宁)摩擦系数 f 是雷诺数 Re 和管道粗糙度 ϵ 的函数。

表 D.1 给出了各种类型净管道的 ϵ 值。

表 D.1 净管道的粗糙系数 ϵ 单位为毫米

管道材料	ϵ	管道材料	ϵ
水泥覆护钢	1~10	熟铁	0.046
混凝土	0.3~3	拉制钢管	0.001 5
铸铁	0.26	玻璃	0
镀锌铁	0.15	塑料	0
型钢	0.046		

对于层流,摩擦系数可按式(D.6)计算:

$$f = \frac{16}{Re} \dots\dots\dots (D.6)$$

对于湍流,摩擦系数可按式(D.7)计算:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -4 \log \left(\frac{1}{3.7} \times \frac{\epsilon}{d} + \frac{1.255}{Re \sqrt{f}} \right) \dots\dots\dots (D.7)$$

对于粗糙管道中发展完全的湍流, f 独立于雷诺数,此时,摩擦系数可按式(D.8)计算:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 4 \log \left(3.7 \frac{d}{\epsilon} \right) \dots\dots\dots (D.8)$$

对于光滑管道, $\epsilon = 0$, 摩擦系数可按式(D.9)计算:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 4 \log \frac{Re \sqrt{f}}{1.255} \dots\dots\dots (D.9)$$

对于光滑管道, 当雷诺数小于 10 000 时, 摩擦系数可按式(D.10)计算:

$$f = 0.079 Re^{-1/4} \dots\dots\dots (D.10)$$

对于管道附件、阀门及其他流动障碍物, 可采用改进的 2-K 方法来计算能量损失, 2-K 方法根据雷诺数和管道内径定义压差损失, 可按式(D.11)计算:

$$K_f = \frac{K_1}{Re} + K_\infty \left(1 + \frac{25.4}{ID} \right) \dots\dots\dots (D.11)$$

式中:

K_f ——超压位差损失(无量纲);

K_1 ——常数(无量纲), 见表 D.2;

K_∞ ——常数(无量纲), 见表 D.2;

Re ——雷诺数(无量纲);

ID ——管道内径, 单位为毫米(mm)。

表 D.2 管道附件和阀门中损失系数的 2-K 常数

附件	附件描述	K_1	K_∞
弯头 90°	标准 ($r/D=1$), 带螺纹	800	0.40
	标准 ($r/D=1$), 采用法兰连接/焊接	800	0.25
	长半径 ($r/D=1.5$), 所有类型	800	0.2
	斜接 ($r/D=1.5$): 1 焊缝 (90°)	1 000	1.15
	2 焊缝 (45°)	800	0.35
	3 焊缝 (30°)	800	0.30
	4 焊缝 (22.5°)	800	0.27
	5 焊缝 (18°)	800	0.25
45°	长半径 ($r/D=1$), 所有类型	500	0.20
	长半径 ($r/D=1.5$)	500	0.15
	斜接, 1 焊缝 (45°)	500	0.25
	斜接, 2 焊缝 (22.5°)	500	0.15
180°	标准 ($r/D=1$), 带螺纹	1 000	0.60
	标准 ($r/D=1$), 采用法兰连接/焊接	1 000	0.35
	长半径 ($r/D=1.5$), 所有类型	1 000	0.30
三通管			
作为弯头使用	标准的, 带螺纹	500	0.70
	长半径, 带螺纹	800	0.40
	标准的, 采用法兰连接/焊接	800	0.80
	短分支	1 000	1.00

表 D.2 (续)

附件	附件描述	K_1	K_∞
贯通	带螺纹	200	0.10
	采用法兰连接/焊接	150	0.50
	短分支	100	0.00
阀门			
闸阀、球阀或旋塞阀	全尺寸, $\beta=1.0$	300	0.10
	缩减尺寸, $\beta=0.9$	500	0.15
	缩减尺寸, $\beta=0.8$	1 000	0.25
球心阀	标准	1 500	4.00
	斜角或 Y 型	1 000	2.00
隔膜阀	Dam(闸坝)类型	1 000	2.00
蝶形阀		800	0.25
止回阀	提升阀	2 000	10.0
	回转阀	1 500	1.50
	倾斜片状阀	1 000	0.50

对于管道的入口和出口,可按式(D.12)计算:

$$K_f = \frac{K_1}{Re} + K_\infty \quad \dots\dots\dots(D.12)$$

对于管道进口, $K_1=160$; 对于一般的进口, $K_\infty=0.50$; 对于边界类型的入口, $K_\infty=1.0$ 。对于管道出口, $K_1=0$; $K_\infty=1.0$ 。对于高雷诺数 ($Re > 10\,000$), 上式中的第一项可忽略, 即 $K_f = K_\infty$; 对于低雷诺数 ($Re < 50$), Re 小于 50, 第一项占支配地位, $K_f = K_1/Re$ 。

物质从管道系统中流出, 质量流率的求解步骤如下:

- a) 假设: 管道长度、直径和类型; 沿管道系统的压力和高度变化; 来自泵、涡轮等对液体的输入或输出功; 管道上附件的数量和类型; 液体的特性, 包括密度和黏度。
- b) 指定初始点(点 1)和终止点(点 2)。
- c) 确定点 1 和点 2 处的压力和高度。确定点 1 处的初始液体流速。
- d) 推测点 2 处的液体流速, 如果认为是完全发展的湍流, 则不需要这一步。
- e) 用式(D.6)~式(D.10)确定管道的摩擦系数。
- f) 确定管道的超压位差损失[式(D.5)]、附件的超压位差损失[式(D.11)]、和进出口效应的超压位差损失[式(D.12)]。将这些压差损失相加, 使用式(D.4)计算净摩擦损失项。使用点 2 处的高度。
- g) 计算式(D.3)中的所用各项的值, 并将其带入到方程中。如果式(D.3)所用项的和等于零, 那么计算结束。如果不等于零, 返回到第 d) 步重新计算。
- h) 使用方程 $m = \rho \bar{u} A$ 确定质量流率。

如果为完全发展的湍流, 则将已知项代入到式(D.3)中, 将点 2 处的速度设为变量, 直接求解该速度。

D.1.4 气体经孔泄漏

当式(D.13)成立时,气体流动属音速流动;当式(D.14)成立时,气体流动属亚音速流动。

$$\frac{p_0}{p} \leq \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad \dots\dots\dots(\text{D.13})$$

$$\frac{p_0}{p} > \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad \dots\dots\dots(\text{D.14})$$

式中:

p_0 ——环境压力,单位为帕斯卡(Pa);

p ——容器内介质压力,单位为帕斯卡(Pa);

γ ——绝热指数, $\gamma=c_p/c_v$ 。

音速流动的气体泄漏质量流率可按式(D.15)计算:

$$Q = C_d A p \sqrt{\frac{M\gamma}{R_g T} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad \dots\dots\dots(\text{D.15})$$

亚音速流动的气体泄漏质量流率可按式(D.16)计算:

$$Q = Y C_d A p \sqrt{\frac{M\gamma}{R_g T} \left(\frac{2}{\gamma+1}\right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}} \quad \dots\dots\dots(\text{D.16})$$

式中:

Q ——气体泄漏质量流率,单位为千克每秒(kg/s);

C_d ——气体泄漏系数,与泄漏孔形状有关,泄漏孔形状为圆形时取 1.00,三角形时取 0.95,长方形时取 0.90;

A ——泄漏孔面积,单位为平方米(m²);

p ——容器内介质压力,单位为帕斯卡(Pa);

M ——泄漏气体或蒸气的相对分子质量;

R_g ——理想气体常数,单位为焦耳每摩尔开尔文[J/(mol·K)];

T ——气体温度,单位为开尔文(K);

Y ——流出系数,按式(D.17)计算。

$$Y = \left[\frac{p_0}{p}\right]^{\frac{1}{\gamma}} \times \left\{1 - \left[\frac{p_0}{p}\right]^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}\right\}^{\frac{1}{\gamma}} \times \left\{\left[\frac{2}{\gamma-1}\right] \times \left[\frac{\gamma+1}{2}\right]^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}}\right\}^{\frac{1}{\gamma}} \quad \dots\dots\dots(\text{D.17})$$

D.1.5 气体管道断裂

D.1.5.1 绝热流动

对于长管或沿管程有较大压差,气体流速在大部分情况下接近声速。对于涉及塞流绝热流动的情况下,已知管长(L)、内径(d)、上游压力(p_1)和温度(T_1),计算质量通量 G 步骤如下:

a) 根据式(D.8)确定 Fanning 摩擦系数 f 。假设是高雷诺数的发展完全的湍流。

b) 马赫数 Ma 可按式(D.18)计算:

$$\frac{\gamma+1}{2} \ln \left[\frac{2Y_1}{(\gamma+1)Ma^2} \right] - \left(\frac{1}{Ma^2} - 1 \right) + \gamma \left(\frac{4fL}{d} \right) = 0 \quad \dots\dots\dots(\text{D.18})$$

$$Y_1 = 1 + \frac{\gamma-1}{2} Ma^2 \quad \dots\dots\dots(\text{D.19})$$

式中:

- Ma —— 马赫数；
- L —— 管道长度，单位为米(m)；
- d —— 管道内径，单位为米(m)；
- Y_1 —— 气体膨胀系数，无量纲。

c) 质量通量 G_{choked} 可按式(D.20)计算：

$$G_{\text{choked}} = p_{\text{choked}} \sqrt{\frac{\gamma M}{R_g T_{\text{choked}}}} \quad \dots\dots\dots (D.20)$$

$$\frac{T_{\text{choked}}}{T_1} = \frac{2Y_1}{\gamma + 1} \quad \dots\dots\dots (D.21)$$

$$\frac{p_{\text{choked}}}{p_1} = Ma \sqrt{\frac{2Y_1}{\gamma + 1}} \quad \dots\dots\dots (D.22)$$

式中：

- G_{choked} —— 质量通量，单位为千克每平方米秒[$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]；
- p_1 —— 上游气体压力，单位为帕斯卡(Pa)；
- p_{choked} —— 下游气体压力，单位为帕斯卡(Pa)；
- T_1 —— 上游气体温度，单位为开尔文(K)；
- T_{choked} —— 下游气体温度，单位为开尔文(K)。

d) 根据式(D.22)确定 p_{choked} ，以确认处于塞流情况。

D.1.5.2 等温流动

对于大多数典型问题，已知管长(L)、内径(d)、上游压力(p_1)和温度(T_1)，质量通量 G_{choked} 计算步骤如下：

- a) 根据式(D.8)确定 Fanning 摩擦系数 f 。假设是高雷诺数发展完全的湍流。
- b) 马赫数 Ma 可按式(D.23)计算：

$$\ln\left(\frac{1}{\gamma Ma^2}\right) - \left(\frac{1}{\gamma Ma^2}\right) + \frac{4fL}{d} = 0 \quad \dots\dots\dots (D.23)$$

c) 质量通量 G_{choked} 可按式(D.24)计算：

$$G_{\text{choked}} = p_{\text{choked}} \sqrt{\frac{M}{R_g T}} \quad \dots\dots\dots (D.24)$$

$$\frac{p_{\text{choked}}}{p_1} = Ma \sqrt{\gamma} \quad \dots\dots\dots (D.25)$$

式中：

- G_{choked} —— 质量通量，单位为千克每平方米秒[$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$]；
- T —— 上游初始温度，单位为开尔文(K)；
- p_{choked} —— 下游塞流压力，单位为帕斯卡(Pa)；
- p_1 —— 上游压力，单位为帕斯卡(Pa)；
- Ma —— 马赫数；
- γ —— 绝热指数， $\gamma = c_p/c_v$ ；
- R_g —— 理想气体常数，单位为焦耳每摩尔开尔文[$\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$]；
- M —— 物质的相对分子质量。

绝热和等温管道方法得到的结果很接近，对于大多数实际情况，并不能很容易地确定热传递特性。因此选择绝热管道方法，计算所得的质量通量较大，适合于保守的安全设计。



D.1.6 泄漏液体蒸发量

D.1.6.1 泄漏液体的蒸发分为闪蒸蒸发、热量蒸发和质量蒸发三种，其蒸发量为这三种蒸发之和。

D.1.6.2 闪蒸蒸发参照附录 D 中的 D.2 计算。

D.1.6.3 当液体闪蒸不完全，有一部分液体在地面形成液池，并吸收地面热量而气化称为热量蒸发。热量蒸发的蒸发速度 Q_2 按式(D.26)计算：

$$Q_2 = \frac{KA_1(T_0 - T_b)}{H\sqrt{\pi\alpha t}} \dots\dots\dots (D.26)$$

式中：

- Q_2 ——热量蒸发速率，单位为千克每秒(kg/s)；
- A_1 ——液池面积，单位为平方米(m^2)；
- T_0 ——环境温度，单位为开尔文(K)；
- T_b ——液体沸点，单位为开尔文(K)；
- H ——液体蒸发热，单位为焦耳每千克(J/kg)；
- α ——表面热扩散系数，单位为平方米每秒(m^2/s)，见表 D.3；
- K ——表面导热系数，单位为瓦特每米开尔文[W/(m·K)]，见表 D.3；
- t ——蒸发时间，单位为秒(s)。

表 D.3 某些地面的热传递(热扩散、导热)系数

地面情况	导热系数 K W/(m·K)	热扩散系数 α m^2/s
水泥	1.1	1.29×10^{-7}
土地(含水 8%)	0.9	4.3×10^{-7}
干涸土地	0.3	2.3×10^{-7}
湿地	0.6	3.3×10^{-7}
沙砾地	2.5	1.1×10^{-6}

D.1.6.4 当热量蒸发结束，转由液池表面气流运动使液体蒸发，称之为质量蒸发。质量蒸发速度 Q_3 可按式(D.27)计算：

$$Q_3 = a \times p \times M / (R \times T_0) \times u^{(2-n)/(2+n)} \times r^{(4+n)/(2+n)} \dots\dots\dots (D.27)$$

式中：

- Q_3 ——质量蒸发速率，单位为千克每秒(kg/s)；
- a, n ——大气稳定度系数，见表 D.4；
- p ——液体表面蒸气压，单位为帕斯卡(Pa)；
- R ——气体常数，单位为焦耳每摩尔开尔文[J/(mol·K)]；
- T_0 ——环境温度，单位为开尔文(K)；
- u ——风速，单位为米每秒(m/s)；
- r ——液池半径，单位为米(m)。

表 D.4 液池蒸发模式参数

稳定度条件	n	a
不稳定(A,B)	0.2	3.846×10^{-3}
中性(D)	0.25	4.685×10^{-3}
稳定(C,F)	0.3	5.285×10^{-3}

液池最大直径取决于泄漏点附近的地域构型、泄漏的连续性或瞬时性。有围堰时,以围堰最大等效半径为液池半径;无围堰时,设定液体瞬间扩散到最小厚度时,推算液池等效半径。

D.1.6.5 液体蒸发总量按式(D.28)计算:

$$W_p = Q_1 t_1 + Q_2 t_2 + Q_3 t_3 \quad \dots\dots\dots (D.28)$$

式中:

- W_p ——液池蒸发总量,单位为千克(kg);
- Q_1 ——闪蒸蒸发速率,单位为千克每秒(kg/s);
- t_1 ——闪蒸蒸发时间,单位为秒(s);
- Q_2 ——热量蒸发速率,单位为千克每秒(kg/s);
- t_2 ——热量蒸发时间,单位为秒(s);
- Q_3 ——质量蒸发速率,单位为千克每秒(kg/s);
- t_3 ——从液体泄漏到液体全部处理完毕的时间,单位为秒(s)。

D.2 闪蒸

D.2.1 闪蒸带走的气体量

泄漏液体的闪蒸比例可按式(D.29)计算:

$$F_v = \frac{C_p(T_T - T_b)}{H_v} \quad \dots\dots\dots (D.29)$$

过热液体闪蒸蒸发速率可按式(D.30)计算:

$$Q_1 = Q_L \times F_v \quad \dots\dots\dots (D.30)$$

式中:

- F_v ——泄漏液体的闪蒸比例;
- T_T ——储存温度,单位为开尔文(K);
- T_b ——泄漏液体的沸点,单位为开尔文(K);
- H_v ——泄漏液体的蒸发热,单位为焦耳每千克(J/kg);
- C_p ——泄漏液体的定压热容,单位为千焦耳每千克开尔文[kJ/(kg·K)];
- Q_1 ——过热液体闪蒸蒸发速率,单位为千克每秒(kg/s);
- Q_L ——物质泄漏速率,单位为千克每秒(kg/s)。

D.2.2 闪蒸带走的液体量

当需要计算闪蒸带走的液体量时,可按照以下方法计算。

在液体闪蒸过程中,除了有一部分液体转变成气体外,还有一部分液体以液滴的形式悬浮在气体中,闪蒸带走的液体量的计算如下:

a) 当 $F_v \leq 0.2$ 时:

带到空气中的液体量可按式(D.31)计算:

$$D = 5 \times F_v \times Q_L \quad \dots\dots\dots (D.31)$$

式中:

D ——带到空气中的液体量,单位为千克每秒(kg/s);

地面液池内液体量可按式(D.32)计算:

$$D_s = (1 - 5 \times F_v) \times Q_L \quad \dots\dots\dots (D.32)$$

式中:

D_s ——地面液池内液体量,单位为千克每秒(kg/s)。

b) 当 $F_v > 0.2$ 时,液体全部带走,地面无液池形成。

D.3 泄漏物质在大气中的扩散

D.3.1 大气稳定度确定

大气稳定度通常采用 Pasquill 分类方法确定,大气稳定度分为 A、B、C、D、E 和 F 六类,大气稳定度的具体分类见表 D.5 和表 D.6。

表 D.5 Pasquill 大气稳定度确定

地面风速 m/s	白天日照			夜间条件	
	强	中等	弱	阴天且云层薄,或低空云量为 4/8	天空云量为 3/8
<2	A	A~B	B		
2~3	A~B	B	C	E	F
3~4	B	B~C	C	D	E
4~6	C	C~D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

表 D.6 日照强度确定

天空云层情况	60°<日照角	35°<日照角<60°	15°<日照角<35°
天空云量为 4/8,或高空有薄云	强	中等	弱
天空云量为 5/8~7/8,云层高度为 2 134 m ~4 877 m	中等	弱	弱
天空云量为 5/8~7/8,云层高度<2 134 m	弱	弱	弱

D.3.2 Pasquill-Gifford 模型扩散方程

D.3.2.1 位于地面 H_r 高处的连续稳态源的烟羽在给定地点 (x, y, z) 的污染物浓度可按照式(D.33)计算:

$$\langle C \rangle(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \times \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z-H_r}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{z+H_r}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} \quad \dots\dots\dots (D.33)$$

式中:

$\langle C \rangle(x, y, z)$ ——连续排放时,形成稳定的流场后,给定地点 (x, y, z) 的污染物的浓度,单位为千克每立方米(kg/m³);



- Q ——连续排放的物料质量流量,单位为千克每秒(kg/s);
- u ——风速,单位为米每秒(m/s);
- σ_y, σ_z ——侧风向和垂直风向的扩散系数,单位为米(m);
- x ——下风向距离,单位为米(m);
- y ——侧风向距离,单位为米(m);
- z ——垂直风向距离,单位为米(m)。

D.3.2.2 位于地面 H_r 高处的瞬时点源的烟团,地面上的坐标系随烟团移动,坐标系的中心位于烟团的中心烟团中心在 $x=ut$ 处,平均浓度方程可按式(D.34)计算:

$$\langle C \rangle(x, y, z, t) = \frac{Q^*}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_y}\right)^2\right] \times \left\{ \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z-H_r}{\sigma_z}\right)^2\right] + \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{z+H_r}{\sigma_z}\right)^2\right] \right\} \dots\dots\dots (D.34)$$

式中:

- $\langle C \rangle(x, y, z, t)$ ——瞬时排放时,给定地点 (x, y, z) 和时间 t 的污染物的浓度,单位为千克每立方米(kg/m^3);
- Q^* ——瞬时排放的物料质量,单位为千克(kg);
- $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ ——下风向,侧风向和垂直风向的扩散系数,单位为米(m)。

D.3.2.3 Pasquill-Gifford 模型扩散系数确定见表 D.7 和表 D.8。

表 D.7 烟羽扩散 Pasquill-Gifford 模型扩散系数方程(下风向距离 x 的单位为米)

Pasquill-Gifford 稳定度等级	σ_y	σ_z
农村条件		
A	$0.22x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$0.20x$
B	$0.16x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$0.12x$
C	$0.11x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$0.08x(1+0.0002x)^{-1/2}$
D	$0.08x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$0.06x(1+0.0005x)^{-1/2}$
E	$0.06x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$0.03x(1+0.0003x)^{-1}$
F	$0.04x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$0.016x(1+0.0003x)^{-1}$
城市条件		
A~B	$0.32x(1+0.0004x)^{-1/2}$	$0.24x(1+0.0001x)^{-1/2}$
C	$0.22x(1+0.0004x)^{-1/2}$	$0.20x$
D	$0.16x(1+0.0004x)^{-1/2}$	$0.14x(1+0.0003x)^{-1/2}$
E~F	$0.11x(1+0.0004x)^{-1/2}$	$0.08x(1+0.0005x)^{-1/2}$

表 D.8 烟团扩散 Pasquill-Gifford 模型扩散系数方程(下风向距离 x 的单位为米)

Pasquill-Gifford 稳定度等级	σ_y/m 或 σ_x/m	σ_z/m	Pasquill-Gifford 稳定度等级	σ_y/m 或 σ_x/m	σ_z/m
A	$0.18x^{0.92}$	$0.60x^{0.73}$	D	$0.06x^{0.92}$	$0.15x^{0.70}$
B	$0.14x^{0.92}$	$0.53x^{0.73}$	E	$0.04x^{0.92}$	$0.10x^{0.65}$
C	$0.10x^{0.92}$	$0.34x^{0.71}$	F	$0.02x^{0.92}$	$0.05x^{0.61}$

D.4 火灾和爆炸

D.4.1 池火计算

池火火焰的几何尺寸及热辐射参数按如下步骤计算：

a) 计算液池直径

当危险单元为油罐或油罐区时，液池直径 D 可按式(D.35)计算：

$$D = \left(\frac{4S}{\pi} \right)^{1/2} \dots\dots\dots (D.35)$$

式中：

S —— 防火堤所围面积，单位为平方米(m^2)；

D —— 液池直径，单位为米(m)。

当危险单元为输油管道且无防护堤时，假定泄漏的液体无蒸发、并已充分蔓延、地面无渗透，则根据泄漏的液体量和地面性质，最大的池面积可按式(D.36)计算：

$$S = W / (H_{\min} \times \rho) \dots\dots\dots (D.36)$$

式中：

W —— 泄漏液体的质量，单位为千克(kg)；

H_{\min} —— 最小物料层厚度，单位为米(m)；

ρ —— 液体的密度，单位为千克每立方米(kg/m^3)。

最小物料层与地面性质对应关系见表 D.9。

表 D.9 不同性质地面物料层厚度

单位为米

地面性质	最小物料层厚度
草地	0.020
粗糙地面	0.025
平整地面	0.010
混凝土地面	0.005
平静的水面	0.001 8

b) 确定火焰高度

计算池火焰高度的经验公式如下：

$$L/D = 42 \times [m_f / (\rho_a \sqrt{gD})]^{0.61} \dots\dots\dots (D.37)$$

式中：

L —— 火焰高度，单位为米(m)；

D —— 池直径，单位为米(m)；

m_f —— 燃烧速率，单位为千克每平方米秒 [$kg/(m^2 \cdot s)$]；

ρ_a —— 空气密度，单位为千克每立方米(kg/m^3)；

g —— 重力加速度，单位为米每二次方秒(m/s^2)。

c) 计算火焰表面热通量

假定能量由圆柱形火焰侧面和顶部向周围均匀辐射，用式(D.38)计算火焰表面的热通量：

$$q_a = \frac{0.25\pi D^2 \Delta H_c m_f f_b}{0.25\pi D^2 + \pi DL} \dots\dots\dots (D.38)$$

式中：

q_0 ——火焰表面的热通量，单位为千瓦特每平方米(kW/m²)；

ΔH_c ——燃烧热，单位为千焦耳每千克(kJ/kg)；

f_h ——热辐射系数，可取 0.15；

m_f ——燃烧速率，单位为千克每平方米秒[kg/(m²·s)]。

d) 目标接收到的热通量的计算

目标接收到的热通量 $q(r)$ 的计算公式为：

$$q(r) = q_0(1 - 0.058 \ln r)V \quad \dots\dots\dots(D.39)$$

式中：

$q(r)$ ——目标接收到的热通量，单位为千瓦特每平方米(kW/m²)；

r ——目标到泄漏中心的水平距离，单位为米(m)；

V ——视角系数。

e) 视角系数的计算

视角系数 V 与目标到火焰垂直轴的距离与火焰半径之比 s 和火焰高度与直径之比 h 有关。

$$V = \sqrt{V_v^2 + V_H^2} \quad \dots\dots\dots(D.40)$$

$$\pi V_H = A - B \quad \dots\dots\dots(D.41)$$

$$A = (b - 1/s) \left\{ \arctan \left[\frac{(b+1)(s-1)}{(b-1)(s+1)} \right]^{0.5} \right\} / (b^2 - 1)^{0.5} \quad \dots\dots\dots(D.42)$$

$$B = (a - 1/s) \left\{ \arctan \left[\frac{(a+1)(s-1)}{(a-1)(s+1)} \right]^{0.5} \right\} / (a^2 - 1)^{0.5} \quad \dots\dots\dots(D.43)$$

$$\pi V_v = \arctan[h / (s^2 - 1)^{0.5}] / s + h(J - K) / s \quad \dots\dots\dots(D.44)$$

$$J = \left[\frac{a}{(a^2 - 1)^{0.5}} \right] \arctan \left[\frac{(a+1)(s-1)}{(a-1)(s+1)} \right]^{0.5} \quad \dots\dots\dots(D.45)$$

$$K = \arctan[(s-1) / (s+1)]^{0.5} \quad \dots\dots\dots(D.46)$$

$$a = (h^2 + s^2 + 1) / (2s) \quad \dots\dots\dots(D.47)$$

$$b = (1 + s^2) / (2s) \quad \dots\dots\dots(D.48)$$

式中：

s ——目标到火焰垂直轴的距离与火焰半径之比；

h ——火焰高度与直径之比；

A 、 B 、 J 、 K 、 V_H 、 V_v ——描述方便而引入的中间变量。

D.4.2 沸腾液体扩展为蒸气云爆炸(BLEVE)计算

采用国际劳工组织建议的沸腾液体扩展为蒸气云爆炸热辐射模型进行计算，步骤如下：

a) 火球直径的计算

火球直径计算公式为：

$$R = 2.9W^{1/3} \quad \dots\dots\dots(D.49)$$

式中：

R ——火球直径，单位为米(m)；

W ——火球中消耗的可燃物质量，单位为千克(kg)；对于单罐储存， W 取罐容量的 50%；对于双罐储存， W 取罐容量的 70%；对于多罐储存， W 取罐容量的 90%。

b) 火球持续时间的计算

火球持续时间按式(D.50)计算：

$$t = 0.45W^{1/3} \quad \dots\dots\dots (D.50)$$

式中:

t ——火球持续时间,单位为秒(s);

W ——火球消耗的可燃物质量,单位为千克(kg)。

c) 目标接收到热辐射通量的计算:

$$q(r) = \frac{q_0 R^2 r (1 - 0.058 \ln r)}{(R^2 + r^2)^{3/2}} \quad \dots\dots\dots (D.51)$$

式中:

q_0 ——火球表面的辐射通量,单位为瓦特每平方米(W/m²);对于柱形罐取 270 W/m²,对于球形罐取 200 W/m²;

r ——目标到火球中心的平均距离,单位为米(m)。

D.4.3 喷射火计算

D.4.3.1 垂直方向喷射火计算

垂直方向喷射火热辐射通量计算步骤如下:

a) 火焰长度的计算

火焰长度按式(D.52)计算:

$$\frac{L}{d_j} = \frac{5.3}{C_T} \sqrt{\frac{T_f/T_j}{\alpha_T} \left[C_T + (1 - C_T) \frac{M_a}{M_f} \right]} \quad \dots\dots\dots (D.52)$$

式中:

L ——火焰长度,单位为米(m);

d_j ——喷管直径,单位为米(m);

C_T ——燃料-空气计算化学反应中燃料的摩尔系数;

T_f ——燃烧火焰的绝热温度,单位为开尔文(K);

T_j ——喷射流体的绝热温度,单位为开尔文(K);

α_T ——燃料-空气计量化学反应中产生每摩尔燃烧产物所需反应物的摩尔数;

M_a ——空气的摩尔质量,单位为克每摩尔(g/mol);

M_f ——燃料的摩尔质量,单位为克每摩尔(g/mol)。

对于大多数燃料而言, C_T 远小于 1, α_T 近似等于 1, T_f 和 T_j 的比值在 7 到 9 之间。

b) 目标接收到热辐射通量的计算

$$q(r) = \tau_a \eta \dot{m} \Delta H_c F_v \quad \dots\dots\dots (D.53)$$

式中:

$q(r)$ ——距离 r 处目标接收到的热通量,单位为千瓦特每平方米(kW/m²);

τ_a ——大气传输率;

η ——热辐射系数;

\dot{m} ——燃料的质量流速,单位为千克每秒(kg/s);

ΔH_c ——燃烧热,单位为千焦耳每千克(kJ/kg);

F_v ——视角因子。

大气传输率可按式(D.54)计算:

$$\tau_a = 2.02 \times (p_w X_w)^{-0.09} \quad \dots\dots\dots (D.54)$$

式中:

τ_a ——大气传输率;

p_w ——大气中水蒸气的分压,单位为帕斯卡(Pa);

X_a ——目标到火焰表面的距离,单位为米(m)。

大气中水蒸气分压 p_w 可按式(D.55)计算:

$$p_w = 101\ 325 \times RH \times e^{(14.4114 - \frac{5.832}{T_a})} \dots\dots\dots (D.55)$$

式中:

p_w ——大气中水蒸气的分压,单位为帕斯卡(Pa);

RH——相对湿度,%;

T_a ——环境温度,单位为开尔文(K)。

视角因子 F_p 可按式(D.56)计算:

$$F_p = \frac{1}{4\pi r^2} \dots\dots\dots (D.56)$$

式中:

r ——目标到火焰中心的距离,单位为米(m)。

D.4.3.2 水平方向喷射火计算

D.4.3.2.1 加压的可燃物泄漏时形成射流,如果在泄漏裂口处被点燃,则形成喷射火。假定火焰为圆锥形,并用从泄漏处到火焰长度 4/5 处的点源模型来表示。

D.4.3.2.2 喷射火的火焰长度可按式(D.57)计算:

$$L = \frac{(H_c m)^{0.444}}{161.66} \dots\dots\dots (D.57)$$

式中:

L ——火焰长度,单位为米(m);

H_c ——燃烧热,单位为焦耳每千克(J/kg);

m ——质量流速,单位为千克每秒(kg/s)。

D.4.3.2.3 距离火焰点源 X (m)处接收到的热辐射通量可按式(D.58)计算:

$$q = \frac{f H_c m \tau}{4\pi X^2 \times 1\ 000} \dots\dots\dots (D.58)$$

式中:

q ——距离 X 处接收的热辐射的通量,单位为千瓦特每平方米(kW/m²);

f ——热辐射率;

τ ——大气传输率。

大气传输率 τ 按式(D.59)计算:

$$\tau = 1 - 0.056\ 5 \ln X \dots\dots\dots (D.59)$$

当为固体火灾时可根据实际情况选择固体火焰模型。

D.4.4 蒸气云爆炸(TNO 模型)计算

D.4.4.1 TNO 方法计算包括以下步骤:

- a) 进行扩散计算,确定可燃气的范围;
- b) 进行区域检查,确定拥挤的区域;
- c) 在被可燃气云覆盖的区域内,确定引起强烈冲击波的爆炸源,包括:
 - 1) 拥挤的空间和建筑物(如工艺设备、平台和管架等);

- 2) 平行平面之间的空间(如汽车底部与地面之间等);
 - 3) 管状结构内的空间(如隧道、桥梁及下水道系统等);
 - 4) 高压泄放喷射形成的剧烈扰动的燃料-空气。
- d) 通过下列步骤,估算区域内(作为爆炸源)燃料-空气混合物的燃烧能:
- 1) 单独考虑每一个爆炸源。
 - 2) 假设位于部分受约束或受阻碍区域的燃料-空气或喷射时剧烈扰动的燃料-空气为气云中的爆炸源,对爆炸冲击波有贡献。
 - 3) 估算出现在区域内(爆炸源)的燃料-空气混合物体积(估算是基于整个区域的大小。注意燃料-空气混合物可能没有充满整个区域,此时爆炸源内的燃料-空气混合物为实际进入该区域的体积;此外在估算受阻碍区域体积时,应减去该区域内设备所占体积)。
 - 4) 爆炸源的燃烧能按式(D.60)计算:

$$E = V_s \times 3.5 \times 10^6 \quad \dots\dots\dots (D.60)$$

式中:

E ——爆炸源内燃料-空气混合物的燃烧能,单位为焦耳(J);

V_s ——爆炸源中燃料-空气混合物体积,单位为立方米(m^3)。

- e) 估计爆炸源的强度 \bar{R}_0 ,取值范围为1~10,如:
- 1) 对气云中未受约束或未受阻碍的部分,取1;
 - 2) 对喷射时强扰动的气云部分,取3;
 - 3) 典型工艺单元,取7~9;
 - 4) 最大爆炸源强度取10。

- f) 比拟距离 \bar{R} 按式(D.61)计算:

$$\bar{R} = \frac{R}{(E/p_0)^{1/3}} \quad \dots\dots\dots (D.61)$$

式中:

\bar{R} ——爆炸源的 Sachs 比拟距离(无量纲);

R ——距爆炸源中心的距离,单位为米(m);

E ——爆炸源的燃烧能,单位为焦耳(J);

p_0 ——环境大气压,单位为帕斯卡(Pa)。

- g) 计算爆炸超压:

查图 D.1 得到 Sachs 比拟爆炸超压 $\bar{\Delta p}_s$,爆炸超压按式(D.62)计算:

$$p = \bar{\Delta p}_s p_0 \quad \dots\dots\dots (D.62)$$

式中:

p ——爆炸超压,单位为帕斯卡(Pa);

$\bar{\Delta p}_s$ ——Sachs 比拟爆炸超压(无量纲);

p_0 ——环境大气压,单位为帕斯卡(Pa)。

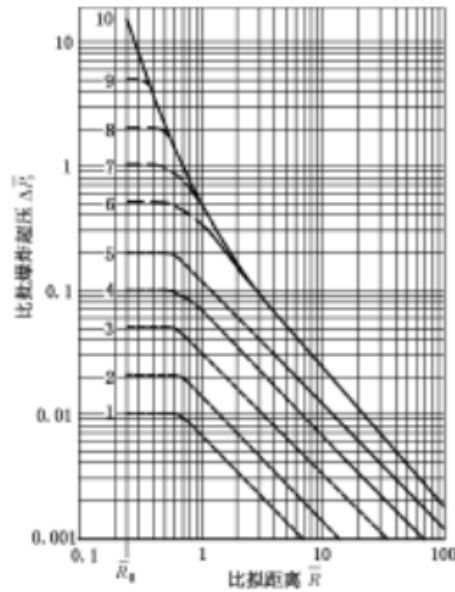


图 D.1 TNO 模型的 Sachs 比拟超压

h) 如果两个爆炸源的距离很近,需考虑两个爆炸源同时爆炸的影响。

D.4.4.2 爆炸源强度选择可采用 Kinsella 方法,见表 D.10。

表 D.10 定性判断法分析表

点火能		受阻塞程度			受约束程度		强度等级
弱	强	强	弱	不存在阻塞	不存在约束	存在约束	
	X	X			X		7~10
	X	X				X	7~10
X		X			X		5~7
	X		X		X		5~7
	X		X			X	4~6
	X			X	X		4~6
X		X				X	4~5
	X			X		X	4~5
X			X		X		3~5
X			X			X	2~3
X				X	X		1~2
X				X		X	1

注: X表示选中的场景。

附录 E
(资料性附录)

探测和连锁切断系统的判定及相应的泄漏时间

表 E.1 和表 E.2 为探测和连锁切断系统分级指南,该表中给出的信息只在评价连续性泄漏时使用。

表 E.1 探测系统的分级指南

探测系统类型	探测系统分级
专门设计的仪器仪表,用来探测系统的运行工况变化所造成的物质损失(即压力损失或流量损失)	A
适当定位探测器,确定物质何时会出现在承压密闭体之外	B
外观检查,照相机,远距离功能的探测器	C

表 E.2 连锁切断系统的分级指南

连锁切断系统类型	连锁切断系统等级
直接在工艺仪表或探测器启动,而无需操作者干预的切断或停机系统	A
操作者在控制室或远离泄放点的其他合适位置启动的切断或停机系统	B
手动操作阀启动的切断系统	C

通过对探测和连锁切断系统的分级,各孔径下的泄漏时间见表 E.3。

表 E.3 基于探测和连锁切断系统等级的泄漏时间

探测系统等级	连锁切断系统等级	泄放时间
A	A	5 mm 泄漏孔径,20 min 25 mm 泄漏孔径,10 min 100 mm 泄漏孔径,5 min
A	B	5 mm 泄漏孔径,30 min 25 mm 泄漏孔径,20 min 100 mm 泄漏孔径,10 min
A	C	5 mm 泄漏孔径,40 min 25 mm 泄漏孔径,30 min 100 mm 泄漏孔径,20 min
B	A 或 B	5 mm 泄漏孔径,40 min 25 mm 泄漏孔径,30 min 100 mm 泄漏孔径,20 min
B	C	5 mm 泄漏孔径,60 min 25 mm 泄漏孔径,30 min 100 mm 泄漏孔径,20 min
C	A,B 或 C	5 mm 泄漏孔径,60 min 25 mm 泄漏孔径,40 min 100 mm 泄漏孔径,20 min

附录 F
(资料性附录)
可燃物质释放事件树及点火概率

F.1 可燃物质释放事件树

可燃物质释放事件树见图 F.1~图 F.5。

F.1.1 易燃气体瞬时释放

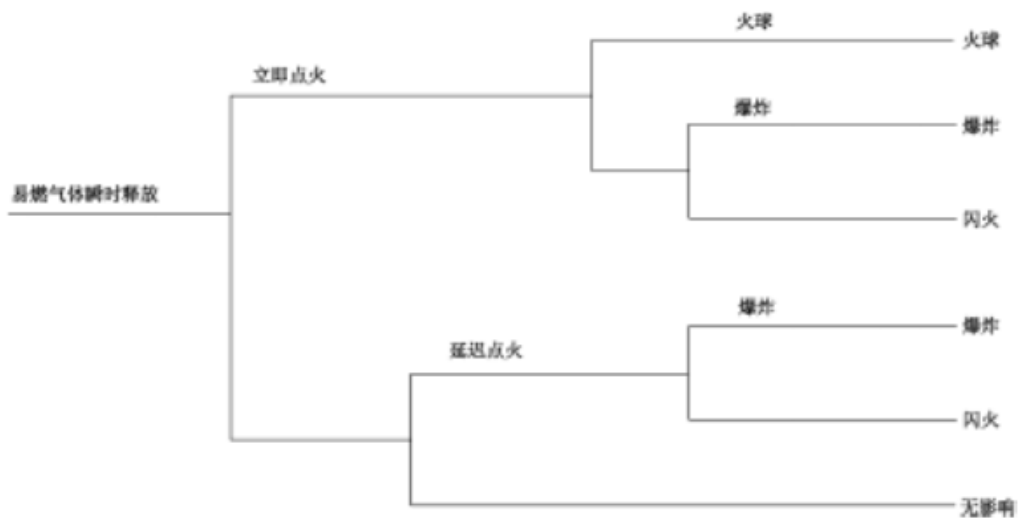


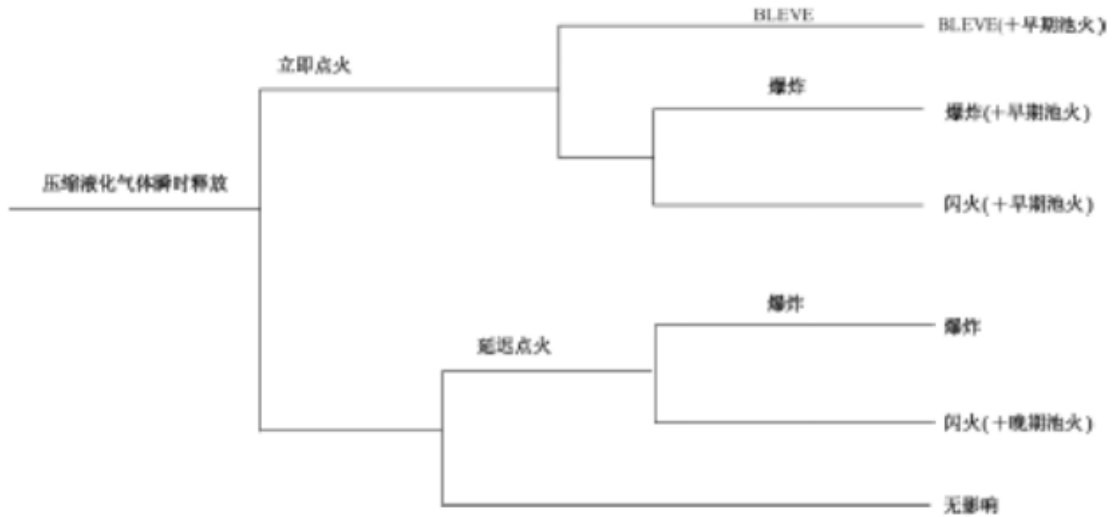
图 F.1 易燃气体瞬时释放事件树

F.1.2 易燃气体连续释放



图 F.2 易燃气体连续释放事件树

F.1.3 压缩液化气体瞬时释放



注：对于压缩液化气体释放，云团可能发生液滴下落到(地)表面，形成液池，点火时可能发生池火。

图 F.3 压缩液化气体瞬时释放事件树

F.1.4 压缩液化气体连续释放

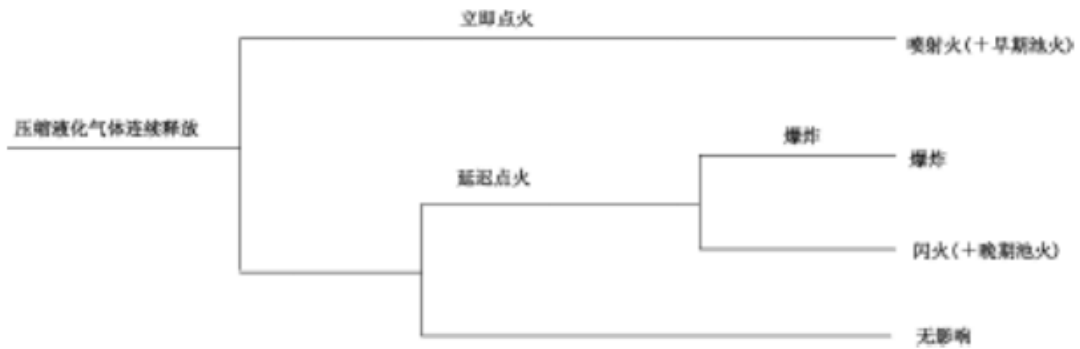
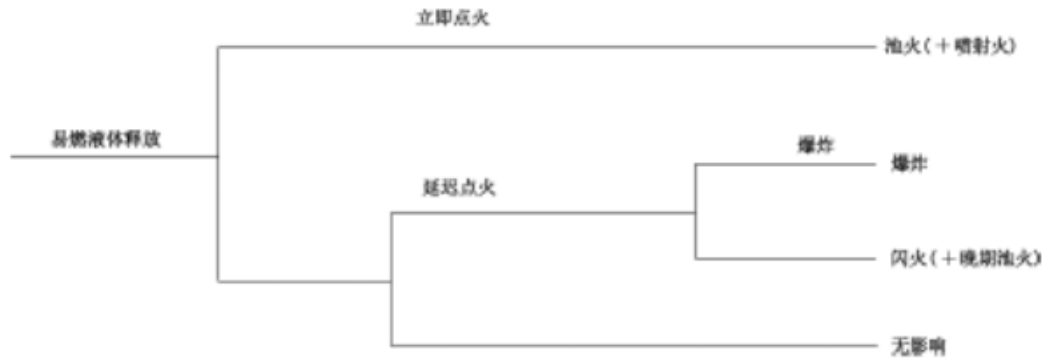


图 F.4 压缩液化气体连续释放事件树

F.1.5 易燃液体释放



注 2：在延迟点火时，除了闪火或爆炸，也将发生池火。

图 F.5 易燃液体释放事件树

F.2 立即点火的点火概率

立即点火的概率与装置类型、物质种类及泄漏(释放)有关。固定装置可燃物质泄漏后，立即点火概率见表 F.1，运输设备可燃物质泄漏后立即点火概率见表 F.2，物质分类见表 F.3。

表 F.1 固定装置可燃物质泄漏后立即点火概率

物质分类	连续释放	瞬时释放	立即点火概率
类别 0(中/高活性)	<10 kg/s	<1 000 kg	0.2
	10 kg/s ~100 kg/s	1 000 kg~10 000 kg	0.5
	>100 kg/s	>10 000 kg	0.7
类别 0(低活性)	<10 kg/s	<1 000 kg	0.02
	10 kg/s ~100 kg/s	1 000 kg~10 000 kg	0.04
	>100 kg/s	>10 000 kg	0.09
类别 1	任意速率	任意量	0.065
类别 2	任意速率	任意量	0.01
类别 3,4	任意速率	任意量	0

表 F.2 企业内运输设备可燃物质泄漏后立即点火概率

物质类别	运输设备	泄漏场景	立即点火概率
类别 0	公路槽车	连续释放	0.1
	公路槽车	瞬时释放	0.4

表 F.2 (续)

物质类别	运输设备	泄漏场景	立即点火概率
类别 0	铁路槽车	连续释放	0.1
	铁路槽车	瞬时释放	0.8
类别 1	槽车	连续释放、瞬时释放	0.065
类别 2	槽车	连续释放、瞬时释放	0.01
类别 3,4	槽车	连续释放、瞬时释放	0

表 F.3 可燃物质分类

物质类别	燃烧性	条件
类别 0	极度易燃	1) 闪点小于 0 °C, 沸点 ≤ 35 °C 的液体 2) 暴露于空气中, 在正常温度和压力下可以点燃的气体
类别 1	高可燃性	闪点 < 21 °C 的液体, 但不是极度易燃的
类别 2	可燃	21 °C ≤ 闪点 ≤ 55 °C 的液体
类别 3	可燃	55 °C < 闪点 ≤ 100 °C 的液体
类别 4	可燃	闪点 > 100 °C 的液体

注 1: 对于类别 2, 3, 4 的物质, 如果操作温度高于闪点, 则立即点火概率按照类别 1 进行考虑。
注 2: 部分化学品的活性分类, 见表 F.4。



表 F.4 部分化学品活性分类

低	中	高
1-氯-2,3-环氧丙烷 1,3-二氯丙烷 3-氯-1-丙烯 氨 溴甲烷 一氧化碳 氯乙烷 氯甲烷 甲烷 四乙铅	1-丁烷 1,2-二氨基乙烷 乙醛 乙腈 丁烷 氯乙烯 二甲胺乙烷 乙基乙酰胺 甲酸 丙烷 丙烯	丁三醇* 乙炔 苯* 二硫化碳* 乙硫醇* 环氧乙烷 甲酸乙酯* 甲醛* 甲基丙烯酸酯* 甲酸甲酯* 甲基环氧乙烷* 石脑油, 溶剂* 四氢噻吩* 乙烯基乙酸盐*

注: 以 * 符号表示的物质, 化学品活性信息非常少, 可将此物质作为高活性物质。

F.3 不同点火源在 1 min 内的点火概率

不同点火源在 1 min 内的点火概率见表 F.5。

表 F.5 点火源在 1 min 内的点火概率

点火源	1 min 内的点火概率
点源	
机动车辆	0.4
火焰	1.0
室外燃烧炉	0.9
室内燃烧炉	0.45
室外锅炉	0.45
室内锅炉	0.23
船	0.5
危化品船	0.3
捕鱼船	0.2
游艇	0.1
内燃机车	0.4
电力机车	0.8
线源	
输电线路	0.2/100 m
公路	注 1
铁路	注 1
面源	
化工厂	0.9 /座
炼油厂	0.9 /座
重工业区	0.7 /座
轻工业区	按人口计算
人口	
居民	0.01 /人
工人	0.01 /人
<p>注 1: 发生泄漏事故地点周边的公路或铁路的点火概率与平均交通密度 d 有关。平均交通密度 d 的计算公式为:</p> $d = N \times E / V$ <p>式中:</p> <p>N——每小时通过的汽车数量,单位为每小时(h^{-1});</p> <p>E——道路或铁路的长度,单位为千米(km);</p> <p>V——汽车平均速度,单位为千米每小时($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)。</p> <p>如果 $d \leq 1$,则 d 的数值就是蒸气云通过时点火源存在的概率,此时</p> $P(t) = d(1 - e^{-d})$ <p>式中:</p> <p>ω——单辆汽车的点火效率,单位为每秒(s^{-1})。</p> <p>如果 $d \geq 1$,则 d 表示当蒸气云经过时的平均点火源数目;则在 $0 \sim t$ 时间内发生点火的概率为:</p> $P(t) = 1 - e^{-d\omega t}$ <p>式中:</p> <p>ω——单辆汽车的点火效率,单位为每秒(s^{-1})。</p> <p>注 2: 对某个居民区而言, $0 \sim t$ 时间内的点火概率的计算公式为:</p> $P(t) = 1 - e^{-n\omega t}$ <p>式中:</p> <p>ω——每个人的点火效率,单位为每秒(s^{-1});</p> <p>n——居民区中存在的平均人数。</p> <p>注 3: 如果其他模型中采用不随时间变化的点火概率,则该点火概率等于 1 min 内的点火概率。</p>	

附录 G
(资料性附录)
影响阈值

G.1 应急响应计划指南(Emergency Response Planning Guidelines, ERPGs)值

G.1.1 物质的 ERPGs 值包括以下 3 类:

- a) ERPG-1:当人员暴露在低于该浓度的环境中 1 h 时,除受到短暂的微弱不良健康影响,或恶劣气味之外,不会有更严重的不良影响。
- b) ERPG-2:当人员暴露在低于该浓度的环境中 1 h 时,不会受到不可逆或严重健康影响,或者不会降低人员自身采取防护措施的能力。
- c) ERPG-3:当人员暴露在低于该浓度的环境中 1 h 时,不会产生危及生命健康的影响。

G.1.2 常用物质的 ERPGs 值见表 G.1。

表 G.1 常用物质的 ERPGs 值(除非注明,所有值的单位均为 10^{-6})

化学物质	ERPG-1	ERPG-2	ERPG-3	化学物质	ERPG-1	ERPG-2	ERPG-3
乙醛	10	200	1 000	氰化氢	NA	10	25
丙烯醛	0.05	0.15	1.5	氟化氢	2	20	50
丙烯酸	1	50	250	硫化氢	0.1	30	100
丙烯腈	10	35	75	异丁腈	ID	30	100
烯丙基氯	3	40	300	氨	25	150	1 500
苯	50	150	1 000	氢化锂	25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
氯苯	1	10	25	甲醇	200	1 000	5 000
溴	0.1	0.5	5	氯甲烷	150	1 000	3 000
1,3-丁二烯	10	500	5 000	二氯甲烷	300	750	4 000
丙烯酸丁酯	0.05	25	250	异氰酸甲酯	0.025	0.25	1.5
异氰酸丁酯	0.01	0.05	1	甲硫醇	0.005	25	100
二硫化碳	1	50	500	甲基三氯硅烷	1	3	25
四氯化碳	20	100	750	一甲胺	10	100	500
氯气	1	3	20	全氟异丁烯	NA	0.1	0.3
三氯化氯	0.1	1	10	苯酚	10	50	200
氯乙酰氯	0.1	1	10	光气	NA	0.5	1.5
三氯硝基甲	NA	0.2	3	五氧化二磷	1 mg/m^3	10 mg/m^3	50 mg/m^3
氯磺酸	2 mg/m^3	10 mg/m^3	30 mg/m^3	环氧丙烷	50	250	750
三氟氯乙烯	20	100	300	苯乙烯	50	250	1 000
2-丁烯醛	0.2	5	15	磺酸	2	10	30
乙硼烷	NA	1	3	二氧化硫	0.3	3	25

表 G.1 (续)

化学物质	ERPG-1	ERPG-2	ERPG-3	化学物质	ERPG-1	ERPG-2	ERPG-3
双烯酮	1	5	50	四氯乙烯	200	1 000	10 000
二甲胺	0.6	100	350	四氯化钛	5 mg/m ³	20 mg/m ³	100 mg/m ³
二甲基氟硅烷	0.8	5	25	甲苯	50	300	1 000
二甲基二硫醚	0.01	50	250	三甲胺	0.1	100	500
表氯醇	2	20	100	六氟化溴	5 mg/m ³	15 mg/m ³	30 mg/m ³
环氧乙烷	NA	50	500	乙酸乙烯酯	5	75	500
甲醛	1	10	40	乙酸	5	35	250
六氯丁二烯	1	3	10	乙酸酐	0.5	15	100
六氟丙酮	NA	1	50	3-氯丙烯	3	40	300
六氟环丙烷	10	50	500	砷化氢	NA	0.5	1.5
氯化氢	3	20	150	苯甲酰氯	0.3	5	20
铍	NA	25 mg/m ³	100 mg/m ³	二氯二甲醚	ID	0.1	0.5
三氟化硼	2 mg/m ³	30 mg/m ³	100 mg/m ³	无水肼	0.5	5	30
乙酸正丁酯	5	200	3 000	盐酸	3	20	150
丁基异氰酸酯	0.01	0.05	1	氢氰酸	NA	10	25
一氧化碳	200	350	500	过氧化氢	10	50	100
二氧化氯	NA	0.5	3	硒化氢	NA	0.2	2
一氯二氟乙烷	10 000	15 000	25 000	氯甲酸异丙酯	ID	5	20
三氟甲烷	NA	50	5 000	碘	0.1	0.5	5
氯甲基甲醛	NA	1.0	10	顺丁烯二酸酐	0.2	2	20
硝基三氟甲烷	0.075	0.15	1.5	汞	NA	0.25	0.5
氯化氙	NA	0.05	4	溴甲烷	NA	50	200
1,2-二氯乙烷	50	200	300	氯甲酸甲酯	NA	2	5
2,4-二氯酚	0.2	2	20	甲基异氰酸酯	0.025	0.25	1.5
二聚环戊二烯	0.01	5	75	二苯甲撑二异氰酸酯	0.2 mg/m ³	2 mg/m ³	25 mg/m ³
1,1-二氟乙烷	10 000	15 000	25 000	硝酸	1	10	78
二乙烯酮	1	5	20	二氧化氮	1	15	30
N,N-二甲基甲酰胺	2	100	200	三氟化氮	200	400	800
二甲硫醚	0.5	1 000	5 000	1-辛烯	40 ^a	800 ^b	2 000
3-氯-1,2-环氧丙烷	5	20	100	四氯乙烯	100	200	1 000
丙烯酸乙酯	0.01	30	300	磷化氢	NA	0.5	5
氯甲酸乙酯	ID	5	10	三氯化磷	0.5	3	15
异辛醇	0.1	100	200	四氯化硅	0.75	5	37
氟	0.5	5	20	氢氧化钠	0.5 mg/m ³	5 mg/m ³	50 mg/m ³

表 G.1 (续)

化学物质	ERPG-1	ERPG-2	ERPG-3	化学物质	ERPG-1	ERPG-2	ERPG-3
氯磺酸	2 mg/m ³	10 mg/m ³	30 mg/m ³	铋化氢	ID	0.5	1.5
呋喃甲醛	2	10	100	正硅酸乙酯	25	100	300
戊二醛	0.2	1	5	四氢呋喃	100	500	5 000
六氟-1,3-丁二烯	1	3	10	正硅酸甲酯	NA	10	20
六氟丙烯	10	50	500	氯化亚砷	0.2	2	10
1-己烯	NA	500	5 000	1,1,1-三氯乙烷	350	700	3 500
三氯乙烯	100	500	5 000	三氯硅烷	1	3	25
三甲基氯硅烷	3	20	150	氯乙炔	500	5 000	20 000
乙烯三氯硅烷	0.5	5	50	1,1-二氯乙烯	ID	500	1 000
八氧化三铈	ID	10 mg/m ³	50 mg/m ³	二氧化铈	ID	10 mg/m ³	30 mg/m ³
六氟化铈	5 mg/m ³	15 mg/m ³	30 mg/m ³	三氧化铈	ID	0.5 mg/m ³	3 mg/m ³
三乙氧基硅烷	0.5	4	10	三甲氧基甲硅烷	0.5	2	5
甲苯-2,4(2,6-) 二异氰酸酯	0.01	0.15	0.6	甲基丙烯酸异 氰基乙酯	ID	0.1	1
异戊二烯	5	1 000	4 000	2,2-二氯-1,1,1- 三氯乙烷	ID	1 000	10 000
二乙基苯	10	100	500	四羟基氯化钴	ID	0.13	0.42
1,1,1,2-四氟-2-氯乙烷	1 000	5 000	10 000	氯乙酰胺	0.05	0.5	10
邻氟苯叉缩丙二腈	0.005 mg/m ³	0.1 mg/m ³	25 mg/m ³	亚乙基降冰片烯	0.02	100	500
三氯甲烷	NA	50	5 000	乙醇	1 800	3 300	NA
甲酸	3	25	250	糠醛	2	10	50
汽油	200	1 000	4 000	1-氯-1,1-二氟乙烷	10 000	15 000	25 000
马来酸酐	0.2	5	20	二苯基甲烷-4,4'- 二异氰酸酯	NA	5 mg/m ³	55 mg/m ³
碘甲烷	25	50	125	甲基叔丁基醚	50	1 000	5 000
发烟硫酸							
硫酸	2 mg/m ³	10 mg/m ³	120 mg/m ³	异氰酸苯酯	0.1	0.4	1.2
三氧化硫							
正磷酸	3 mg/m ³	30 mg/m ³	150 mg/m ³	二甲基二氯硅烷	2	10	75
硅酸四乙酯	25	100	300	氧化化硫	0.3	3	15
乙酰基乙烯酮	1	5	50	二硫化二甲基	0.01	50	250
2,3,3,3-四氟丙烯	NA	24 000	NA	2-异丙基丙烯酸乙酯	NA	0.1	1
注1: NA表示尚未分析;ID表示数据不充分。							
注2: 上述物质的ERPG数值由美国工业卫生协会2016年公布,ERPG值定期更新,宜使用最新的ERPG值。							
* 25%的最低爆炸下限。							
b 10%的最低爆炸下限。							

G.2 热辐射

不同热辐射强度造成的伤害和损坏见表 G.2。

表 G.2 不同热辐射强度造成的伤害和损坏

热辐射强度 kW/m ²	对设备的损坏	对人的伤害
37.5	操作设备损坏	1%死亡(10s) 100%死亡(1 min)
25.0	在无火焰,长时间辐射下木材燃烧的最小能量	重大烧伤(10s) 100%死亡(1 min)
12.5	有火焰时,木材燃烧及塑料熔化的最低能量	1度烧伤(10 s) 1%死亡(1 min)
6.3	—	在 8 s 内裸露皮肤有痛感;无热辐射屏蔽设施时,操作人员穿上防护服可停留 1 min
4.7	—	暴露 16 s,裸露皮肤有痛感;无热辐射屏蔽设施时,操作人员穿上防护服可停留几分钟
1.58	—	长时间暴露无不适感

G.3 超压

不同超压对建筑物造成的影响和损坏见表 G.3。

表 G.3 超压对建筑物的影响(近似值)

压力 kPa	影响
0.14	令人厌恶的噪声(137 dB,或低频 10 Hz~15 Hz)
0.21	已经处于疲劳状态下的大玻璃偶尔破碎
0.28	产生大的噪声(143 dB)、玻璃破裂
0.69	处于压力应变状态的小玻璃破裂
1.03	玻璃破裂的典型压力
2.07	“安全距离”(低于该值,不造成严重损坏的概率为 0.95);抛射限值;屋顶出现某些破坏;10%的窗户玻璃被打碎
2.76	有限的较小结构破坏
3.4~6.9	大窗户和小窗户通常破碎;窗户框架偶尔遭到破坏
4.8	房屋建筑物受到较小的破坏
6.9	房屋部分破坏,不能居住
6.9~13.8	石棉板粉碎;钢板或铝板起皱,紧固失效;木板固定失效、吹落
9.0	钢结构的建筑物轻微变形
13.8	房屋的墙和屋顶局部坍塌
13.8~20.7	没有加固的混凝土墙毁坏

表 G.3 (续)

压力 kPa	影响
15.8	严重结构破坏的低限值
17.2	房屋砌砖 50%破坏
20.7	工厂建筑物内的重型机械(1 362 kg)轻微损坏;钢结构建筑变形,并离开基础
20.7~27.6	自成构架的钢面板建筑破坏;油储罐破裂
27.6	轻工业建筑物的覆层破裂
34.5	木制的支撑柱折断;建筑物内高大液压机(18 160 kg)轻微破坏
34.5~48.2	房屋几乎完全破坏
48.2	装载货物的火车车厢倾翻
48.2~55.1	未加固的 203.2 mm~304.8 mm 厚的砖板因剪切或弯曲导致失效
62.0	装载货物的火车货车车厢完全破坏
68.9	建筑物可能全部遭到破坏;重型机械工具(3 178 kg)移位并严重损坏,非常重的机械工具(5 448 kg)幸免

附录 H

(资料性附录)

死亡概率与概率值对应关系及物质毒性常数

H.1 死亡概率与概率值的对应关系见表 H.1。

表 H.1 P_d 和 P_r 的对应关系

P_d %	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0		2.67	2.95	3.12	3.25	3.36	3.45	3.52	3.59	3.66
10	3.72	3.77	3.82	3.87	3.92	3.96	4.01	4.05	4.08	4.12
20	4.16	4.19	4.23	4.26	4.29	4.33	4.36	4.39	4.42	4.45
30	4.48	4.50	4.53	4.56	4.59	4.61	4.64	4.67	4.69	4.72
40	4.75	4.77	4.80	4.82	4.85	4.87	4.90	4.92	4.95	4.97
50	5.00	5.03	5.05	5.08	5.10	5.13	5.15	5.18	5.20	5.23
60	5.25	5.28	5.31	5.33	5.36	5.39	5.41	5.44	5.47	5.50
70	5.52	5.55	5.58	5.61	5.64	5.67	5.71	5.74	5.77	5.81
80	5.84	5.88	5.92	5.95	5.99	6.04	6.08	6.13	6.18	6.23
90	6.28	6.34	6.41	6.48	6.55	6.64	6.75	6.88	7.05	7.33
99	0.0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
	7.33	7.37	7.41	7.46	7.51	7.58	7.58	7.65	7.88	8.09

H.2 常用物质的毒性常数见表 H.2。

物质	a	b	n	物质	a	b	n
丙烯醛	-4.1	1	1	氟化氢	-8.4	1	1.5
丙烯腈	-8.6	1	1.3	硫化氢	-11.5	1	1.9
烯丙醇	-11.7	1	2	溴甲烷	-7.3	1	1.1
氨	-15.6	1	2	异氰酸盐钾	-1.2	1	0.7
谷硫磷	-4.8	1	2	二氧化氮	-18.6	1	3.7
溴	-12.4	1	2	对硫磷	-6.6	1	2
一氧化碳	-7.4	1	1	光气(碳酰氯)	-10.6	2	1
氯	-6.35	0.5	2.75	磷胺(大灭虫)	-2.8	1	0.7
乙烯	-6.8	1	1	磷化氢	-6.8	1	2
氯化氢	-37.3	3.69	1	二氧化硫	-19.2	1	2.4

参 考 文 献

- [1] GB 50160 石油化工企业设计防火规范
- [2] HG/T 20660 压力容器中介质毒性危害和爆炸危险程度分类标准
- [3] 国家安全生产监督管理总局,中华人民共和国工业和信息化部,中华人民共和国公安部,等.危险化学品目录(2015版):公告2015年第5号[DB/OL].(2015-02-27)[2018-07-23].http://www.chinasafety.gov.cn/zjnsjg/ajss/wxhxpqjg/gggw_419/xzrk_423/201503/t20150309_207141.shtml.
- [4] 国家安全生产监督管理总局.国家安监总局办公厅关于印发危险化学品目录(2015版)实施指南(试行)的通知:安监总厅管三〔2015〕80号[DB/OL].(2015-08-19)[2018-07-23].http://www.chinasafety.gov.cn/zjnsjg/ajss/wxhxpqjg/gggw_419/tzgg_420/201509/t20150902_207057.shtml.
-