



中华人民共和国安全生产行业标准

AQ/T 3046—2013

化工企业定量风险评估导则

Guidelines for quantitative risk assessment of chemical enterprises

2013-06-08 发布

2013-10-01 实施

国家安全生产监督管理总局 发布

目 次

前言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 基本程序 3

5 定量风险评价项目管理 4

6 资料数据收集 4

7 危险辨识和评价单元选择 5

8 泄漏场景及频率 6

9 源项和气云扩散 10

10 暴露影响 12

11 风险计算 13

12 风险可接受标准 17

13 风险评价 17

附录 A(规范性附录) 定量风险评价基本程序 18

附录 B(资料性附录) 定量风险评价项目管理 19

附录 C(规范性附录) 评价单元选择方法——危险度评价法 21

附录 D(规范性附录) 评价单元选择方法——设备选择数法 23

附录 E(资料性附录) 源项和气云扩散计算 28

附录 F(资料性附录) 探测和隔离系统的判定及相应的泄漏时间 44

附录 G(资料性附录) 可燃物质释放事件树及点火概率 45

附录 H(资料性附录) 影响阈值 50

附录 I(规范性附录) 死亡概率与概率值对应关系及物质毒性常数 55

参考文献 56

前 言

本标准按照 GB/T 1.1—2009 给出的规则起草。

本标准由国家安全生产监督管理总局提出。

本标准由全国安全生产标准化技术委员会化学品安全分技术委员会(SAC/TC 288/SC 3)归口。

本标准起草单位:中国石油化工股份有限公司青岛安全工程研究院、化学品安全控制国家重点实验室、国家安全生产监督管理总局化学品登记中心、国家石化项目风险评估技术中心。

本标准主要起草人:张海峰、牟善军、白永忠、党文义、武志峰、于安峰、沈郁、韩中枢、赵文芳。

化工企业定量风险评价导则

1 范围

本标准规定了化工企业定量风险评价过程中的技术要求。

本标准适用于化工企业的定量风险评价,不适用于公路运输、铁路运输、水上运输、长输管道等企业外运输设施的定量风险评价。

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 50160 石油化工企业设计防火规范

AQ 8001 安全评价通则

HG 20660 压力容器中介质毒性危害和爆炸危险程度分类

SY/T 6714 基于风险检验的基础方法

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

危险 hazard

可能造成人员伤亡、职业病、财产损失、环境破坏的根源或状态。

3.2

危险辨识 hazard identification

采用系统分析方法识别出系统中存在的危险或事故隐患。

3.3

失效 failure

系统、结构或元件失去其原有包容流体或能量的能力(如泄漏)。

3.4

失效频率 failure frequency

失效事件所发生的频率,单位为/年。

3.5

失效后果 failure consequence

失效事件的结果,一个事件有一个或多个结果。

3.6

风险 risk

发生特定危害事件的可能性与后果的乘积。

3.7

定量风险评价 quantitative risk assessment

对某一设施或作业活动中发生事故频率和后果进行定量分析,并与风险可接受标准比较的系统方法。

3.8

单元 unit

具有清晰边界和特定功能的一组设备、设施或场所,在泄漏时能与其他单元及时切断。

3.9

故障树分析 fault tree analysis

又名事故树,它是通过对可能造成系统失效的各种因素(包括硬件、软件、环境、人为因素等)进行分析,画出逻辑框图(故障树),从而确定系统失效原因的各种可能组合方式及其发生概率。

3.10

存量 containment

设备或单元可能释放流体量的上限。

3.11

常压储罐 atmospheric storage tank

设计压力小于或等于 6.9 kPa(罐顶表压)的储罐。

3.12

压力储罐 pressurized storage tank

设计压力大于或等于 0.1 MPa(罐顶表压)的储罐。

3.13

单防罐 single containment storage tank

带隔热层的单壁储罐或由内罐和外罐组成的储罐。其内罐能适应储存低温冷冻液体的要求,外罐主要是支撑和保护隔热层,并能承受气体吹扫的压力,但不能储存内罐泄漏出的低温冷冻液体。

3.14

双防罐 double containment storage tank

由内罐和外罐组成的储罐。其内罐和外罐都能适应储存低温冷冻液体,在正常操作条件下,内罐储存低温冷冻液体,外罐能够储存内罐泄漏出来的冷冻液体,但不能限制内罐泄漏的冷冻液体所产生的气体排放。

3.15

全防罐 full containment storage tank

由内罐和外罐组成的储罐。其内罐和外罐能适应储存低温冷冻液体,内外罐之间的距离为 1 m~2 m,罐顶由外罐支撑,在正常操作条件下,内罐储存低温冷冻液体,外罐既能储存冷冻液体,又能限制内罐泄漏液体所产生的气体排放。

3.16

源项 modeling source term

可能引起急性伤害的触发事件,如危险物质泄漏、火灾、爆炸等。

3.17

射流 jet

泄漏出来的高速气流与空气混合形成的轴向蔓延速度远大于环境风速的云羽。

3.18

事件树分析 event tree analysis

根据规则用图形来表示由初因事件可能引起的多事件链,以追踪事件破坏的过程及各事件链发生

的概率。

3. 19

闪火 **flash fire**

在不造成超压的情况下物质云团燃烧时所发生的现象。

3. 20

池火 **pool fire**

可燃液体泄漏后流到地面形成液池,或流到水面并覆盖水面,遇到火源燃烧而形成池火。

3. 21

点火源 **ignition source**

能够使可燃物与助燃物(包括某些爆炸性物质)发生燃烧或爆炸的能量源。

3. 22

蒸气云爆炸 **vapor cloud explosion**

当可燃气体(或可燃蒸气)与空气预先混合后,遇到点火源发生点火,由于存在某些特殊原因或条件,火焰加速传播,产生蒸气云爆炸。

3. 23

喷射火 **jet fire**

加压的可燃物质泄漏时形成射流,在泄漏口处被点燃,由此形成喷射火。

3. 24

火球 **fire ball**

大量燃料与周围的空气有限混合后燃烧时所发生的现象。

3. 25

个体风险 **individual risk**

个体在危险区域可能受到危险因素某种程度伤害的频发程度,通常表示为个体死亡的发生频率,单位为/年。

3. 26

社会风险 **societal risk**

群体(包括职工和公众)在危险区域承受某种程度伤害的频发程度,通常表示为大于或等于 N 人死亡的事故累积频率(F),通常以累积频率和死亡人数之间关系的曲线图($F-N$ 曲线)来表示。

3. 27

潜在生命损失(PLL) **potential loss of life**

单位时间某一范围内全部人员中可能死亡人员的数目。

3. 28

尽可能合理降低原则($ALARP$) **as low as reasonably practice**

在当前的技术条件和合理的费用下,对风险的控制要做到在合理可行的原则下“尽可能的低”。

3. 29

死亡概率(P) **probability of death**

表示个体死于暴露下的概率大小, P 为 $0\sim 1$ 之间的无因次数。

4 基本程序

定量风险评价包括以下步骤,流程图参见附录 A:

- a) 准备;
- b) 资料数据收集;

- c) 危险辨识;
- d) 失效频率分析;
- e) 失效后果分析;
- f) 风险计算;
- g) 风险评价;
- h) 确定评价结论,编制风险评价报告。

5 定量风险评价项目管理

5.1 定量风险评价项目管理主要包括以下步骤,流程图参见附录 B.1:

- a) 了解用户需求;
- b) 确定研究目的和目标;
- c) 确定研究深度;
- d) 确定评价规则;
- e) 制定项目计划;
- f) 项目执行。

5.2 在定量风险评价前,应确定以下评价规则:

- a) 风险度量形式和风险可接受标准;
- b) 数据采集、处理及缺失数据的处理;
- c) 评价数据、假设、过程及结果的记录;
- d) 评价小组组成及培训要求;
- e) 失效频率的计算方法及原则;
- f) 点火概率的计算方法;
- g) 失效后果的计算方法及原则;
- h) 风险的计算方法及原则;
- i) 风险评价结果及建议的符合性审查。

5.3 宜对评价小组成员进行培训,明确定量风险评价小组成员所需的技能及在团队中的职责。小组成员包括但不限于风险评价项目经理、企业主管、工艺/设备工程师、安全工程师/风险分析师及风险评价技术专家等。定量风险评价小组成员职责及培训内容参见附录 B.2。

6 资料数据收集

6.1 一般资料数据

应根据评价的目标和深度确定所需收集的资料数据,包括但不限于表 1 的资料数据。

表 1 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	危险物质存量、危险物质安全技术说明书(SDS)、现有的工艺危害分析[如危险与可操作性分析(HAZOP)]结果、点火源等
设计和运行数据	区域位置图、平面布置图、设计说明、工艺技术规范、安全操作规程、工艺流程图(PFD)、管道和仪表流程图(P&ID)、设备数据、管道数据、运行数据等

表 1 定量风险评价收集的一般资料数据（续）

类别	一般资料数据
减缓控制系统	探测和隔离系统(可燃气体和有毒气体检测、火焰探测、电视监控、连锁切断等),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、培训、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、太阳辐射热等)、风速、风向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	评价目标(范围)内室内和室外人口分布

6.2 人口数据

6.2.1 人口分布统计时,应遵循以下原则:

- 根据评价目标,确定人口统计的地域边界;
- 考虑人员在不同时间上的分布,如白天与晚上;
- 考虑娱乐场所、体育馆等敏感场所人员的流动性;
- 考虑已批准的规划区内可能存在的人口。

6.2.2 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、地理信息系统或商业途径获得的数据。

6.3 点火源

6.3.1 化工企业典型点火源分为:

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

6.3.2 应对评价单元的工艺条件、设备(设施)、平面布局等资料进行分析,结合现场调研,确定最坏事故场景影响范围内的潜在点火源,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。

7 危险辨识和评价单元选择

7.1 危险辨识

7.1.1 应按照 AQ 8001 第 6.2 条的规定对评价对象进行系统的危险辨识,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。

7.1.2 危险辨识可采用如下方法:

- 系统危险辨识方法,如预先危险分析(PHA)、“如果-怎么样”(What-if)分析、危险与可操作性分析(HAZOP)、故障类型和影响分析(FMEA)、故障树分析(FTA)和事件树分析(ETA)等;
- 依据 GB 18218 进行危险化学品重大危险源辨识;
- 事故案例分析;
- 其他方法。

7.2 评价单元选择

7.2.1 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并选择需要进行定量风险评价的单元,选择的评价单元应能代表评价对象的风险水平。

7.2.2 评价单元选择可采用如下方法:

- a) 危险度评价法(见附录 C);
- b) 设备选择数法(见附录 D);
- c) 其他方法。

8 泄漏场景及频率

8.1 泄漏场景

8.1.1 基本泄漏场景

泄漏场景根据泄漏孔径大小可分为完全破裂以及孔泄漏两大类,有代表性的泄漏场景见表 2。当设备(设施)直径小于 150 mm 时,取小于设备(设施)直径的孔泄漏场景以及完全破裂场景。

表 2 泄漏场景

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

8.1.2 设备典型泄漏场景

泄漏场景应根据设备(设施)的工艺条件、历史事故和实际的运行环境进行确定,可采用表 3 定义的典型泄漏场景。

表 3 设备(设施)典型泄漏场景

序号	设备(或设施)种类	泄 漏 场 景
1	管线	见 8.1.3
2	常压储罐	见 8.1.4
3	压力储罐	见 8.1.5
4	工艺容器和反应容器	见 8.1.6
5	泵和压缩机	见 8.1.7
6	换热器	见 8.1.8
7	压力释放设施	见 8.1.9
8	化学品仓库	见 8.1.10
9	爆炸物品储存	见 8.1.11
10	公路槽车或铁路槽车	见 8.1.12
11	运输船舶	见 8.1.13

8.1.3 管线

管线泄漏场景见 8.1.1,并满足以下要求:

- a) 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 3 个位置的完全破裂:
 - 管线前端;
 - 管线中间;
 - 管线末端。
- b) 对于长管线,宜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。

8.1.4 常压储罐

常压储罐泄漏场景见表 4。

表 4 常压储罐泄漏场景

储罐类型	泄漏到环境中				泄漏到外罐中			
	5 mm 孔径 泄漏	25 mm 孔径 泄漏	100 mm 孔 径泄漏	完全破裂	5 mm 孔径 泄漏	25 mm 孔径 泄漏	100 mm 孔 径泄漏	完全破裂
单防罐	√	√	√	√				
双防罐				√	√	√	√	√
全防罐				√				
地下储罐	注 1							
注 1：对地下储罐，如果设有限制液体蒸发到环境中的封闭设施，则泄漏场景考虑为地下储罐完全破裂以及封闭设施失效引发的液池蒸发，反之，根据地下储罐类型，考虑为单防罐、双防罐或全防罐的泄漏场景。 注 2：如果储罐的储存液位变化较大，且对风险计算结果产生重大影响时，可考虑不同液位的概率。 注 3：对于其他类型的储罐，可根据实际情况选择表 4 中的场景。								

8.1.5 压力储罐

压力储罐泄漏场景见 8.1.1。对于储存压缩液化气体的压力储罐,当储存液位变化较大,且对风险计算结果产生重大影响时,可考虑不同液位的概率。

8.1.6 工艺容器和反应容器

工艺容器和反应容器的定义见表 5,其泄漏场景见 8.1.1。对于蒸馏塔附属的再沸器、冷凝器、泵、回流罐、工艺管线等其他相关部件的泄漏场景可按照各自的设备类型考虑。

表 5 工艺容器和反应容器的定义

类型	定 义	例 子
工艺容器	容器内物质只发生物理性质(如温度或相态)变化的容器(不包括 8.1.8 中的换热器)	蒸馏塔、过滤器等
反应容器	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

8.1.7 泵和压缩机

泵和压缩机的泄漏场景取吸入管线的泄漏场景,见 8.1.1;当泵或压缩机的吸入管线直径小于 150 mm 时,则最后一种泄漏场景的孔尺寸为吸入管线的直径。

8.1.8 换热器

换热器泄漏场景见表 6。

表 6 换热器泄漏场景

换热器类型	具体分类	泄漏位置	场 景			
			泄漏场景 1	泄漏场景 2	泄漏场景 3	泄漏场景 4
板式换热器	危险物质在板间通道内	板间危险物质泄漏	5 mm 孔径泄漏	25 mm 孔径泄漏	100 mm 孔径泄漏	破裂
管式换热器	危险物质在壳程	壳程内危险物质泄漏	5 mm 孔径泄漏	25 mm 孔径泄漏	100 mm 孔径泄漏	破裂
	危险物质在管程,壳程的设计压力大于管程危险物质的最大压力	管程内危险物质泄漏				10 条管道破裂
	危险物质在管程,壳程的设计压力小于或等于管程危险物质的最大压力	管程内危险物质泄漏	一条管道 5 mm 孔径泄漏	一条管道 25 mm 孔径泄漏	一条管道破裂	10 条管道破裂
	管程和壳程内同时存在危险物质,壳程的设计压力大于管程危险物质的最大压力	壳程内危险物质泄漏	5 mm 孔径泄漏	25 mm 孔径泄漏	100 mm 孔径泄漏	破裂
		管程内危险物质泄漏				10 条管道破裂
	管程和壳程内同时存在危险物质,壳程的设计压力小于或等于管程危险物质的最大压力	壳程内危险物质泄漏	5 mm 孔径泄漏	25 mm 孔径泄漏	100 mm 孔径泄漏	破裂
		管程内危险物质泄漏	一条管道 5 mm 孔径泄漏	一条管道 25 mm 孔径泄漏	一条管道破裂	10 条管道破裂
注 1: 假设泄漏物质直接泄漏到大气环境中。 注 2: 其他换热器可按表 6 的具体分类进行泄漏场景设置。						

8.1.9 压力释放设施

当压力释放设施的排放气直接排入大气环境中,应考虑压力释放设施的风险,其场景可取压力释放设施以最大释放速率进行排放。

8.1.10 化学品仓库

化学品仓库宜考虑物料在装卸和存储等处理活动中,由毒性固体的释放、毒性液体的释放或火灾造成的毒性风险。

8.1.11 爆炸物品储存

爆炸物品储存应考虑储存单元发生爆炸和火灾两种场景。在储存单元内发生爆炸,采用储存单元爆炸场景。如果爆炸不会发生,采用储存单元火灾场景。

8.1.12 公路槽车或铁路槽车

企业内部公路槽车或铁路槽车的泄漏场景应考虑槽车自身失效引起的泄漏和装卸活动导致的泄漏。泄漏场景见表 7。

表 7 公路槽车或铁路槽车泄漏场景

设备(设施)	泄漏场景
公路槽车或铁路槽车	1)孔泄漏,孔直径等于槽车最大接管直径 2)槽车破裂
装卸软管	见 8.1.1
装卸臂	见 8.1.1

8.1.13 运输船舶

企业内部码头运输船舶的泄漏事件应考虑装卸活动和外部影响(冲击),泄漏场景见表 8。

表 8 运输船舶泄漏场景

设备(设施)	泄漏场景	备 注
装卸臂	见 8.1.1	装卸活动
气体罐(运输船上的)	见 8.1.1	外部影响(冲击)
半冷冻式罐	见 8.1.1	外部影响(冲击)
单壁液体罐	见 8.1.1	外部影响(冲击)
双壁液体罐	见 8.1.1	外部影响(冲击)
注 1: 外部影响如船舶碰撞引起的泄漏由具体情况确定,可不考虑罐体完全破裂。如果船停泊在港口外,外部碰撞造成的泄漏可不考虑。 注 2: 如果装卸臂由多根管道组成,装卸臂的完全破裂相当于所有管道同时完全破裂。		

8.2 泄漏频率

8.2.1 泄漏频率可使用以下数据来源:

- a) 适用于化工行业的失效数据库;
- b) 企业历史统计数据;
- c) 基于可靠性的失效概率模型;
- d) 其他数据来源。

8.2.2 泄漏频率数据选择应考虑以下事项:

- a) 应确保使用的失效数据与数据内在的基本假设相一致;
- b) 使用化工行业数据库时,宜考虑下列因素对泄漏频率的影响:
——减薄;

- 衬里；
- 外部破坏；
- 应力腐蚀开裂；
- 高温氢腐蚀；
- 机械疲劳(对于管线)；
- 脆性断裂；
- 其他引起泄漏的危害因素。

c) 如果使用企业历史统计数据,则只有该历史数据充足并具有统计意义时才能使用。

8.2.3 可考虑企业工艺安全管理水平对泄漏频率的影响,可采用 SY/T 6714 第 8.4 条的规定进行修正。

8.2.4 当 8.1 中泄漏场景发生的频率小于 10^{-8} /年或事故场景造成的死亡概率小于 1% 时,在定量风险评价时可不考虑这种场景。

9 源项和气云扩散

9.1 源项和气云扩散计算

9.1.1 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。

9.1.2 在选择源项和气云扩散模型时,应考虑泄漏物质的特性。模型及相关计算条件的科学性已得到试验数据验证或模型比较研究论证等,源项和气云扩散计算模型参见附录 E。

9.2 泄漏

9.2.1 对每一个泄漏场景应选择一个合适的泄漏模型,不同泄漏场景的泄漏速率计算方法参见附录 E.1。

9.2.2 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。

9.2.3 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。

9.2.4 泄漏一般考虑为无阻挡释放,以下两种情况宜考虑泄漏位置附近的地面或者物体的阻挡作用：

- a) 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,见式(1)：

$$L_j = 12u_0 \frac{b_0}{u_{\text{air}}} \dots\dots\dots (1)$$

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:频率为 $P_i \times f$ 的有阻挡释放和频率为 $(1-P_i) \times f$ 的无阻挡释放。

9.2.5 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应根据实际运行数据确定, 当缺乏数据时可采用 SY/T 6714 第 7.4 条推荐的方法进行估算。

9.2.6 在确定有效泄漏时间时, 应考虑设备和相连系统中的存量、探测和隔离时间以及可能采取的任何反应措施。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 3 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) 基于探测及隔离系统等级的泄漏时间, 参见附录 F。

9.3 闪蒸和液池蒸发

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

9.3.2 液池扩展应考虑地面粗糙度、障碍物以及液体收集系统等的影响, 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。

9.4 扩散

9.4.1 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。

9.4.2 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。

9.4.3 在计算扩散时, 宜选择稳定、中等稳定、不稳定, 低风速、中风速和高风速等多种天气条件。当使用 Pasquill 大气稳定度(参见附录 E. 3)时, 可选择以下 6 种天气类别, 见表 9。

表 9 选择的天气条件

单位为米每秒

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

9.4.4 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 16 种风向。气象统计资料宜采用评价单元附近气象站的气象统计数据。

9.5 火灾和爆炸

9.5.1 对于可燃气体或液体泄漏(释放)应考虑发生沸腾液体扩展蒸气云爆炸(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。可燃物质释放事件树参见附录 G.1。

9.5.2 点火分为立即点火和延迟点火。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概率参见附录 G.2。

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,可按式(2)计算:

$$P(t) = P_{\text{present}}(1 - e^{-\omega t}) \quad \dots\dots\dots (2)$$

式中:

$P(t)$ —— $0 \sim t$ 时间内发生点火的概率;

P_{present} —— 点火源存在的概率;

ω —— 点火效率,单位为每秒(s^{-1}),与点火源特性有关;

t —— 时间,单位为秒(s)。

常见点火源在 1 min 内的点火概率参见附录 G.3。

9.5.3 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附录 E.4.2。

9.5.4 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 G.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。

9.5.5 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,计算方法参见附录 E.4.3。

9.5.6 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。

9.5.7 气云爆炸产生的冲击波超压计算宜考虑气云的受约束或阻碍状况,计算方法参见附录 E.4.4。

9.6 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,宜采用下列步骤反映减缓控制系统的作用:

- a) 确定系统起作用需要的时间 t ;
- b) 确定系统的效果;
- c) $0 \sim t$ 时间内不考虑减缓控制作用;
- d) t 时间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概率。

10 暴露影响

10.1 死亡概率计算

10.1.1 有毒气体、热辐射和超压的影响参见附录 H。

10.1.2 给定暴露下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 函数关系见下

式, P_d 和 P_r 的对应关系见附录 I.1:

$$P_d = 0.5 \times \left[1 + \operatorname{erf} \left(\frac{P_r - 5}{\sqrt{2}} \right) \right] \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中:

t ——暴露时间,单位为秒(s)。

10.2 中毒

毒性暴露下死亡概率值可按下式计算:

$$P_{r\text{毒}} = a + b \ln(C^n t) \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中:

$P_{r\text{毒}}$ ——毒性暴露下的死亡概率值;

a, b, n ——描述物质毒性的常数,见附录 I.2;

C ——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。

10.3 热辐射危害

10.3.1 火球、池火及喷射火的死亡概率值可按下式计算:

$$P_{r\text{热}} = -36.38 + 2.56 \ln(Q^{4/3} t) \quad \dots\dots\dots (6)$$

式中:

$P_{r\text{热}}$ ——热辐射暴露下的死亡概率值;

Q ——热辐射强度,单位为瓦每平方米(W/m^2);

t ——暴露时间,单位为秒(s),最大值为 20 s。

10.3.2 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%。

10.4 闪火和爆炸

10.4.1 闪火的火焰区域等于点燃时可燃云团 LFL 的范围。闪火火焰区域内,人员的死亡概率值为 100%;闪火火焰区域外,人员的死亡概率值为 0。

10.4.2 对于蒸气云爆炸,在 0.03 MPa 超压影响区域内,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。

11 风险计算

11.1 定量风险评价风险度量分为个体风险和社会风险。个体风险可表现为个体风险等值线,社会风险可表现为 $F-N$ 曲线和潜在生命损失 PLL 。

11.2 个体风险和社会风险的表现形式应满足:

- 个体风险应在标准比例尺地理图上以等值线的形式给出,宜表示出频率不小于 $10^{-8}/\text{a}$ 的个体风险等值线;
- 社会风险应绘制 $F-N$ 曲线。

11.3 在计算个体风险和社会风险时,应对评价区域进行计算网格划分,遵循的原则为:

- 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;

- b) 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;
- c) 将点火概率分配到每一个网格单元,如果网格中有多个点火源,则将所有的点火源合并成处于网格单元中心的单个点火源。

11.4 个体风险考虑人员处于室外的情况,社会风险应考虑人员处于室外和室内两种情况。在计算个体风险和社会风险时,可按下式进行修正:

$$P_{\text{个体风险}} = \beta_{\text{个体风险}} P_d \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$P_{\text{社会风险}} = \beta_{\text{社会风险}} P_d \quad \dots\dots\dots (8)$$

式中:

- P_d ——人员的死亡概率;
- $P_{\text{个体风险}}$ ——个体风险计算时的死亡概率;
- $P_{\text{社会风险}}$ ——社会风险计算时的人口死亡百分比;
- $\beta_{\text{个体风险}}$ ——个体风险计算时的死亡概率修正因子;
- $\beta_{\text{社会风险}}$ ——社会风险计算时的人口死亡百分比修正因子。
- β 取值见表 10。

表 10 修正因子 β 取值

场 景		$\beta_{\text{个体风险}}$	$\beta_{\text{社会风险}}$	
		室外	室外	室内
爆炸	爆炸超压 ≥ 0.03 MPa	1	1	1
	$0.01 \text{ MPa} < \text{爆炸超压} < 0.03 \text{ MPa}$	a		
	爆炸超压 ≤ 0.01 MPa	0	0	0
闪火范围内		1	1	1
闪火范围外		0	0	0
热辐射强度小于 37.5 kW/m^2	火球	1	0.14^b	0
	喷射火	1	0.14^b	0
	池火	1	0.14^b	0
热辐射强度大于或等于 37.5 kW/m^2	火球	1	1	1
	喷射火	1	1	1
	池火	1	1	1
毒性		1	1	1^c
a 爆炸超压 $0.01 \text{ MPa} \sim 0.03 \text{ MPa}$ 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%。 b 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 0.14 倍,因此修正因子为 0.14。 c 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。				

11.4.1 个体风险计算程序如图 1 所示,步骤如下:

- 选择一个泄漏场景(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 $P_M P_\phi$;
- 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 (可燃物)条件下网格单元上的死亡概率 $P_{\text{个体风险}}$,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的贡献:

$$\Delta IR_{S,M,\phi,i} = f_s P_M P_\phi P_i P_{\text{个体风险}} \dots\dots\dots (9)$$

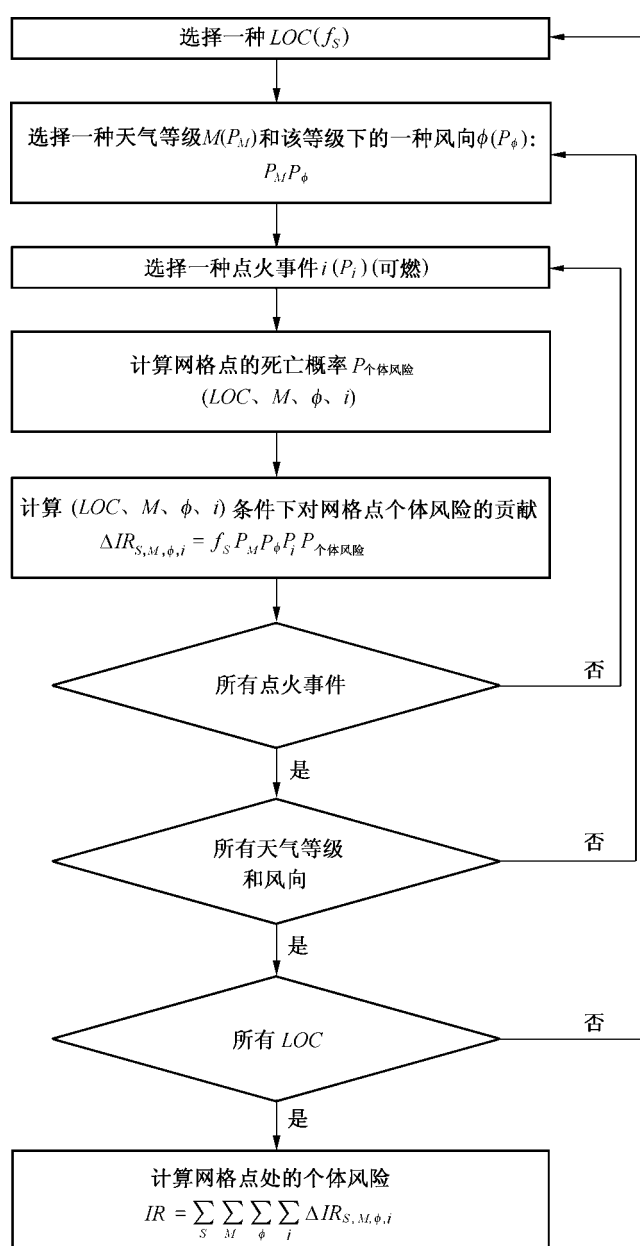


图 1 网格点处的个体风险计算程序

- f) 对所有的点火事件,重复 c)~e)步的计算;对所有的天气等级和风向,重复 b)~e)步的计算;对所有的 LOC ,重复 a)~e)步的计算,则网格点处的个体风险由下式计算:

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

11.4.2 社会风险计算程序如图 2 所示,步骤如下:

- 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 , 概率为 P_M ;
 - 3) 选择天气等级 M 下的一种风向 ϕ , 概率为 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,确定网格单元内的人数 N_{cell} 。
- c) 计算在特定的 LOC 、 M 、 ϕ 及 i 下网格单元内的人口死亡百分比 $P_{\text{社会风险}}$, 计算中参考高度取 1 m。
- d) 计算在特定的 LOC 、 M 、 ϕ 及 i 下网格单元内的死亡人数 $\Delta N_{S,M,\phi,i}$:

$$\Delta N_{S,M,\phi,i} = P_{\text{社会风险}} N_{\text{cell}} \dots\dots\dots (11)$$

- e) 对所有网格单元,重复 b)~d)步的计算,对 LOC 、 M 、 ϕ 及 i ,计算死亡总人数 $N_{S,M,\phi,i}$:

$$N_{S,M,\phi,i} = \sum_{\text{所有网格单元}} \Delta N_{S,M,\phi,i} \dots\dots\dots (12)$$

- f) 计算 LOC 、 M 、 ϕ 及 i 的联合频率 $f_{S,M,\phi,i}$:

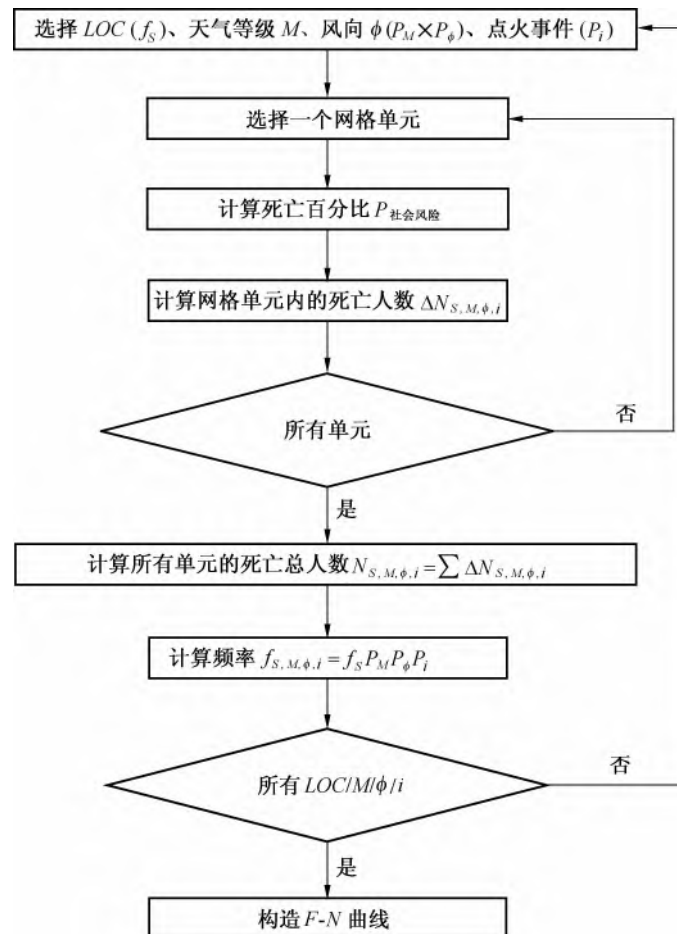


图 2 社会风险计算流程

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

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

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

11.5 潜在生命损失 PLL 应按下式进行计算:

$$PLL = \sum_{i=1}^n f_i N_i \quad \dots\dots\dots (15)$$

式中:

PLL ——潜在生命损失;

f_i ——事件 i 结果的频率, 单位为 /年;

N_i ——第 i 个事件的死亡人数。

12 风险可接受标准

12.1 风险可接受标准确定原则

企业在进行定量风险评价前, 应确定风险可接受标准值。确定风险可接受标准时应遵循以下原则:

- 风险可接受标准应具有一定的社会基础, 能够被政府和公众所接受;
- 重大危害对员工个人或公众成员造成的风险不应显著增加人们日常生活中已经存在的风险;
- 风险可接受标准应和社会经济发展水平相适应, 并适时更新;
- 应考虑企业内部和企业外部个体风险的差异。

12.2 风险可接受标准值

个体风险可接受标准值和社会风险可接受标准值应满足国家安全生产监督管理总局令(第 40 号)的相关要求。

13 风险评价

将风险评价的结果和风险可接受标准进行比较, 判断项目的实际风险水平是否可以接受, 可采用尽可能合理降低原则(ALARP):

- 如果风险水平超过容许上限, 该风险不能被接受;
- 如果风险水平低于容许下限, 该风险可以被接受;
- 如果风险水平在容许上限和下限之间, 可考虑风险的成本与效益分析, 采取降低风险的措施, 使风险水平“尽可能低”。

此外, 对于可能造成严重后果的事件, 应努力降低此事件发生的频率。

附 录 A
(规范性附录)
定量风险评价基本程序

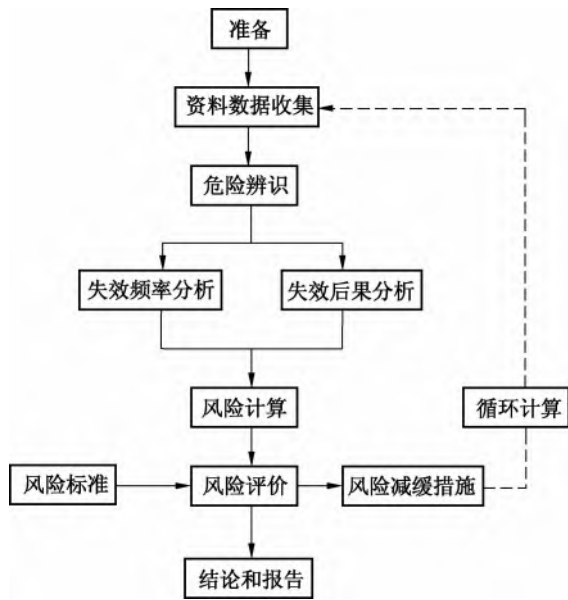


图 A. 1 定量风险评价基本程序

附 录 B
(资料性附录)
定量风险评价项目管理

B.1 定量风险评价项目管理

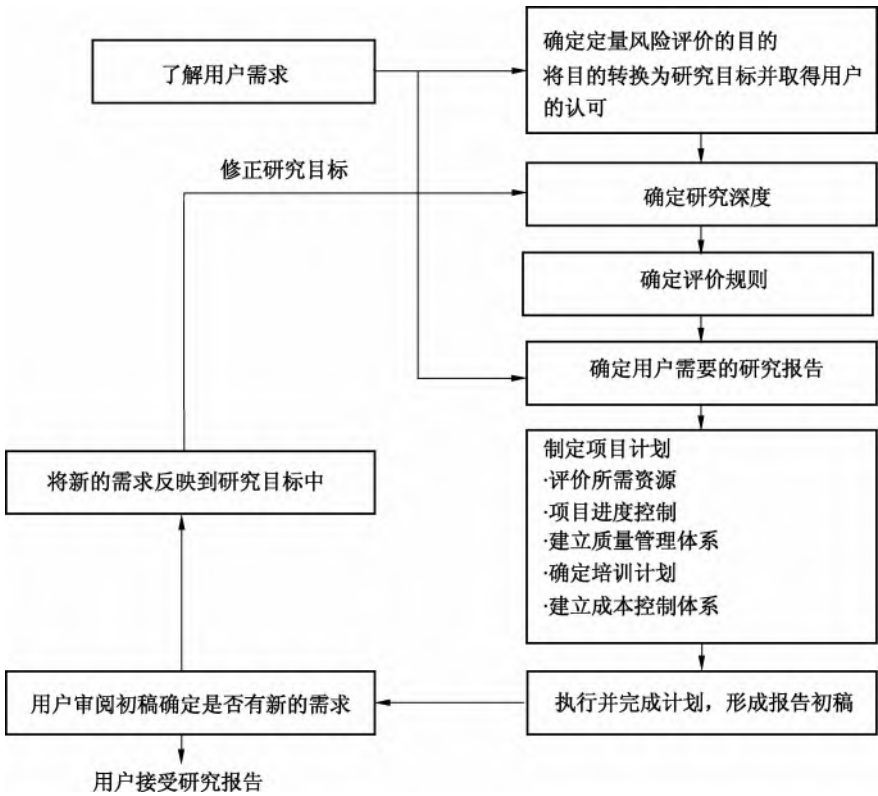


图 B.1 定量风险评价项目管理

B.2 定量风险评价小组成员职责及培训内容

B.2.1 定量风险评价小组成员职责

表 B.1 定量风险评价小组成员职责

人 员	主要工作职责
企业主管	• 确定评价工作的范围和目的 • 根据评价工作的需求,批准所需资源 • 理解研究结果 • 审查减缓风险的措施 • 基于风险评价的结果做出决策

表 B.1 定量风险评价小组成员职责（续）

人 员	主要工作职责
风险评价项目经理	• 与企业主管协商,确定评价工作的范围和目的 • 确定所需资源 • 控制风险评价工作进度 • 质量控制 • 协调相关部门及人员 • 审查减缓风险的措施
工艺/设备工程师	• 工艺流程说明 • 提供工艺操作参数 • 设备参数 • 提供装置内的危险物质种类及储存数量 • 参与提出最终评价结果 • 审查减缓风险的措施
安全工程师/风险分析师	• 协助确定风险评价范围 • 开展具体的风险评价(包括危险性分析、后果、频率及风险计算等) • 对风险评价的结果进行解释 • 提供定量风险评价技术培训
风险评价技术专家	• 提供广泛的定量风险评价技术的建议 • 改进定量风险评价技术 • 提供定量风险评价技术培训

B.2.2 定量风险评价培训内容

B.2.2.1 对企业主管及参与评价项目相关人员的培训内容：

- 定量风险评价方法介绍；
- 项目管理与控制；
- 在项目中承担的职责。

B.2.2.2 定量风险评价工作组成员的培训内容：

- 定量风险评价原理；
- 定量风险评价方法；
- 失效频率的计算方法和原则；
- 失效后果的计算方法和原则；
- 数据的采集、审核及缺失数据的处理。

附 录 C
(规范性附录)

评价单元选择方法——危险度评价法

C.1 危险度评价法

该方法以各单元的物质、容量、温度、压力和操作 5 项指标进行评定,每一项又分为 A、B、C、D 4 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度等级。危险度评价取值表见表 C.1。

表 C.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(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 项之物质
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 ~ 1 000 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. 气体小于 100 m ³ 2. 液体小于 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、烷基化、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 20660 中表 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,应按其反应相态选择上述规定。				

C.2 危险度分级

危险度分级见表 C.2。

表 C.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

可选择总分值大于或等于 11 分的单元(装置)进行定量风险评价。

附 录 D
(规范性附录)
评价单元选择方法——设备选择数法

D.1 引言

设备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,其流程示意图如图 D.1 所示。具体步骤如下:

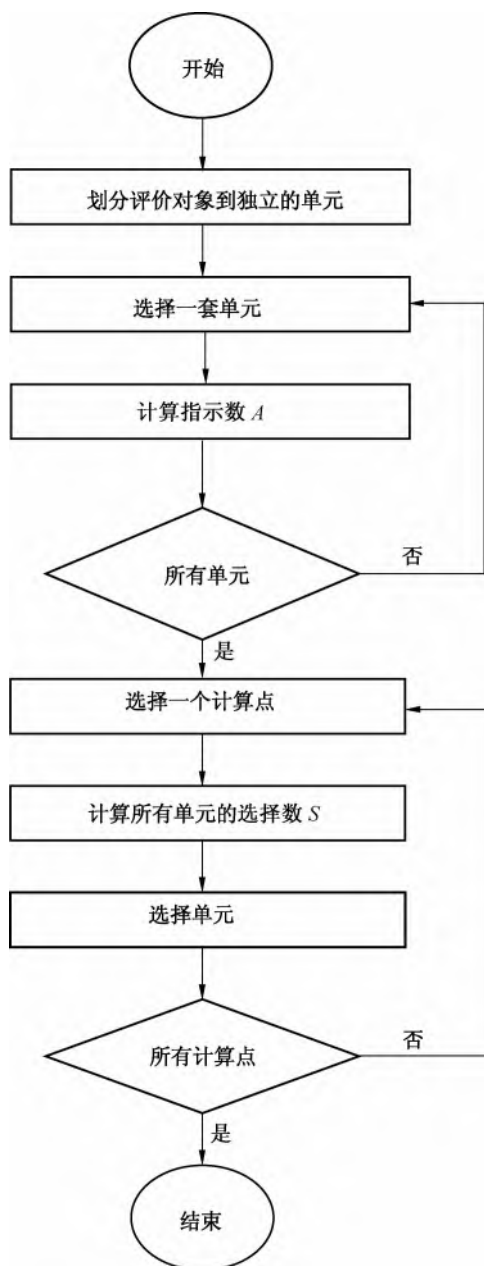


图 D.1 设备选择数法流程示意图

- 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) 计算企业周边系列点上单元造成的危险。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。

D.2 单元划分

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。

D.3 计算指示数

指示数 A 为无量纲量，表征了单元的固有危险，由式(D.1)计算：

$$A=f(Q, Q_1, Q_2, Q_3, G)=\frac{QQ_1Q_2Q_3}{G} \dots\dots\dots (D.1)$$

式中：

Q ——单元中物质的质量，单位为千克(kg)；

Q_1 ——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；

Q_2 ——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；

Q_3 ——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)；

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。

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(如炸药)， $Q_1=Q_2=Q_3=1$ ，则 $A=Q/G$ 。

D.3.1 因子 Q_1 、 Q_2 、 Q_3

D.3.1.1 工艺条件因子 Q_1 的取值见表 D.1。

表 D.1 Q_1 取值一览表

单元类型	Q_1
工艺单元	1
储存单元	0.1

D.3.1.2 工艺条件因子 Q_2 的取值见表 D.2。

表 D.2 Q_2 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
单元有围堰,工艺温度 $T_p \leq \text{沸点 } T_{bp} + 5\text{ }^\circ\text{C}$	1
单元有围堰,工艺温度 $T_p > \text{沸点 } T_{bp} + 5\text{ }^\circ\text{C}$	0.1
注 1: 对于储存单元,工艺温度可视为储存温度。 注 2: 封闭式单元应能阻止物质泄漏时扩散到环境中。它要求封闭设施应能承受装置物质瞬时释放的物理压力,此外封闭设施应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到原来的 1/5,或者封闭设施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,否则它应该作为一个室外单元。 注 3: 围堰应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。	

D.3.1.3 工艺条件因子 Q_3 取值见表 D.3。

表 D.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 $1 \times 10^5\text{ Pa} \leq \text{工艺温度下饱和蒸汽压} < 3 \times 10^5\text{ Pa}$	$X + \Delta$
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: $X = 45 p_{\text{sat}} - 3.5$, 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 D.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 D.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

D.3.2 阈值 G

D.3.2.1 有毒物质的阈值

有毒物质的阈值由致死浓度 L_{C50} (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 D.5。

表 D.5 有毒物质阈值表

$L_{C50} / \text{mg/m}^3$	25 °C 时物质的相态	阈值 G/kg
$L_C \leq 100$	气相	3
	液相(L)	10
	液相(M)	30
	液相(H)	100
	固态	300
$100 < L_C \leq 500$	气相	30
	液相(L)	100
	液相(M)	300
	液相(H)	1 000
	固态	3 000
$500 < L_C \leq 2\,000$	气相	300
	液相(L)	1 000
	液相(M)	3 000
	液相(H)	10 000
	固态	∞
$2\,000 < L_C \leq 20\,000$	气相	3 000
	液相(L)	10 000
	液相(M)	∞
	液相(H)	∞
	固态	∞
$L_C > 20\,000$	所有相	∞
注 1: 液相(L)表示, 25 °C ≤ 物质常压沸点 < 50 °C。 注 2: 液相(M)表示, 50 °C < 物质常压沸点 ≤ 100 °C。 注 3: 液相(H)表示, 物质常压沸点 > 100 °C。		

D.3.2.2 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 $G = 1 \times 10^4 \text{ kg}$ 。

D.3.2.3 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。

D.3.3 计算指示数 A

对于单元中物质 i 的指示数 A_i ，由式(D.2)计算：

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

式中：

Q_i ——单元中物质 i 的质量，单位为 kg；

G_i ——物质 i 的阈值，单位为 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有毒物质、可燃物质和爆炸物质 3 类，分别计算毒性指示数 A^T 、可燃指示数 A^F 和爆炸指示数 A^E ，计算公式见式(D.3)～式(D.5)：

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

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

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

式中：

i ——各类物质；

P ——工艺条件。

一个单元可能有 3 个不同的指示数。此外，如该物质既属于可燃物质又有毒性，则应分别计算该物质的 A^F 、 A^T 。

D.4 计算选择数 S

选择数 S 由式(D.6)～式(D.8)计算：

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

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

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

式中：

L ——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 。

D.5 选择单元

如果单元满足下列条件之一，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 E
(资料性附录)
源项和气云扩散计算

E.1 泄漏速率计算

E.1.1 液体经管道上的孔流出

质量流率为

$$Q_m = AC_0 \sqrt{2\rho(p - p_0)} \quad \dots\dots\dots (E.1)$$

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_0 ——液体泄漏系数;

ρ ——泄漏液体密度,单位为千克每立方米(kg/m^3);

p ——管道内液体压力,单位为帕(Pa);

p_0 ——环境压力,单位为帕(Pa)。

液体泄漏系数 C_0 是雷诺准数和孔直径的函数,经验数据如下:

- a) 对于锋利的孔和雷诺准数大于 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。

E.1.2 液体经储罐上的孔流出

瞬时质量流率为

$$Q_m = \rho AC_0 \sqrt{2\left(\frac{p - p_0}{\rho} + gh_L\right)} \quad \dots\dots\dots (E.2)$$

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(Pa);

p_0 ——环境压力,单位为帕(Pa);

C_0 ——液体泄漏系数;

g ——重力加速度,单位为米每二次方秒,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)。

E.1.3 液体管道断裂

不可压缩液体在管道中流动,能量式如下:

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

式中：

- Δp ——管道两端压力差,单位为帕(Pa);
 - ρ ——液体密度,单位为千克每立方米(kg/m³);
 - $\bar{u}$ ——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,对于层流, α 取 0.5;对于湍流, α 取 1.0;对于湍流 $\alpha \rightarrow 1.0$;
 - g ——重力加速度,单位为米每二次方秒(m/s²);
 - 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,单位为米牛每千克(m·N/kg);
 - W_s ——轴功,单位为帕米(Pa·m);
 - m ——质量流速,单位为千克每秒(kg/s)。
- 对于有摩擦阻力的设备,摩擦损失项形式为

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

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 为

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

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 和管道粗糙系数 ϵ 的函数。
- 表 E. 1 给出了各种类型净管道的 ϵ 值。

表 E. 1 净管道的粗糙系数 ϵ

管道材料	ϵ mm	管道材料	ϵ mm
水泥覆护钢	1~10	熟铁	0.046
混凝土	0.3~3	拉制钢管	0.0015
铸铁	0.26	玻璃	0
镀锌铁	0.15	塑料	0
型钢	0.046		

对于层流,摩擦系数可按下式计算：

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

对于湍流,摩擦系数可按下式求解：

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

对于粗糙管道中发展完全的湍流, f 独立于雷诺数,此时,摩擦系数可按下式计算：

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

对于光滑管道, $\epsilon=0$,摩擦系数可按下式计算：

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

对于光滑管道,当雷诺数小于 10 000 时,摩擦系数可按下式计算:

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

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。

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

式中:

- K_f ——超压位差损失(无量纲);
- K_1 ——常数(无量纲),见表 E.2;
- K_∞ ——常数(无量纲),见表 E.2;
- ID ——管道内径,单位为毫米(mm)。

表 E.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
	斜接($r/D=1.5$),2 焊缝(45°)	800	0.35
	斜接($r/D=1.5$),3 焊缝(30°)	800	0.30
	斜接($r/D=1.5$),4 焊缝(22.5°)	800	0.27
	斜接($r/D=1.5$),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
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

表 E.2 管道附件和阀门中损失系数的 2-K 常数 (续)

附 件	附件描述	K_1	K_∞
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,可改为

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

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(E.6)~式(E.10)确定管道的摩擦系数。
- f) 确定管道的压差损失[式(E.5)]、附件的压差损失[式(E.11)]和进出口效应的压差损失[式(E.12)]。将这些压差损失相加, 使用式(E.4)计算净摩擦损失项。使用点 2 处的高度。
- g) 计算式(E.3)中的所用各项的值, 并将其代入到方程中。如果式(E.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(E.3)中, 将点 2 处的速度设为变量, 直接求解该速度。

E.1.4 气体经孔泄漏

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

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

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

式中:

p_0 ——环境压力,单位为帕(Pa);

p ——容器内介质压力,单位为帕(Pa);

γ ——绝热指数, $\gamma = c_p / c_v$ 。

音速流动的气体泄漏质量流率为

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

亚音速流动的气体泄漏质量流率为

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

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,为三角形时取 0.95,为长方形时取 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(Pa);

M ——泄漏气体或蒸气的分子量;

R_g ——理想气体常数,单位为焦每摩开[J/(mol·K)];

T ——气体温度,单位为开(K);

Y ——流出系数,按式(E.17)计算。

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

E.1.5 气体管道断裂

E.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,已知管道长度(L)、管道内径(d)、上游压力(p_1)和温度(T_1),计算质量通量 G 步骤如下:

a) 由式(E.8)确定 Fanning 摩擦系数 f ,假设是高雷诺数的完全发展的湍流,随后验证这一假设,通常情况下该假设是正确的;

b) 确定马赫数 M_{a1} :

$$\frac{\gamma+1}{2} \ln \left[\frac{2Y_1}{(\gamma+1)M_{a1}^2} \right] - \left(\frac{1}{M_{a1}^2} - 1 \right) + \gamma \left(\frac{4fL}{d} \right) = 0 \dots\dots\dots (E.18)$$

$$Y_1 = 1 + \frac{\gamma-1}{2} M_{a1}^2 \dots\dots\dots (E.19)$$

式中:

M_{a1} ——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) 确定质量通量 G_{choked} :

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

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

$$\frac{p_{\text{choked}}}{p_1} = M_{\text{a1}} \sqrt{\frac{2Y_1}{\gamma + 1}} \quad \dots\dots\dots (\text{E. 22})$$

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(Pa);

p_{choked} ——下游气体压力,单位为帕(Pa);

T_1 ——上游气体温度,单位为开(K);

T_{choked} ——下游气体温度,单位为开(K)。

d) 由式(E. 22)确定 p_{choked} ,以确认处于塞流情况。

E. 1. 5. 2 等温流动

对于大多数典型问题,已知管道长度(L)、管道内径(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) 由式(E. 8)确定 Fanning 摩擦系数 f ,假设是高雷诺数的完全发展的湍流,随后验证这一假设,通常情况下该假设是正确的;

b) 确定马赫数 M_{a1} :

$$\ln\left(\frac{1}{\gamma M_{\text{a1}}^2}\right) - \left(\frac{1}{\gamma M_{\text{a1}}^2}\right) + \frac{4fL}{d} = 0 \quad \dots\dots\dots (\text{E. 23})$$

c) 确定质量通量 G_{choked} :

$$\frac{p_{\text{choked}}}{p_1} = M_{\text{a1}} \sqrt{\gamma} \quad \dots\dots\dots (\text{E. 24})$$

$$G_{\text{choked}} = p_{\text{choked}} \sqrt{\frac{M}{R_g T}} \quad \dots\dots\dots (\text{E. 25})$$

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(K);

p_{choked} ——下游塞流压力,单位为帕(Pa);

p_1 ——上游压力,单位为帕(Pa);

M_{a1} ——马赫数;

γ ——绝热指数, $\gamma = c_p/c_v$;

R_g ——理想气体常数,单位为焦每摩开[$\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$];

M ——物质分子量。

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。

E. 1. 6 泄漏液体蒸发量

E. 1. 6. 1 闪蒸蒸发

闪蒸蒸发见 E. 2。

E. 1. 6. 2 热量蒸发

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。热量蒸发速率 Q_2 按下式计算:

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

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(K);
- T_b ——液体沸点,单位为开(K);
- H ——液体蒸发热,单位为焦每千克(J/kg);
- α ——表面热扩散系数,单位为平方米每秒(m^2/s),见表 E. 3;
- K ——表面导热系数,单位为瓦每米开[W/($m \cdot K$)],见表 E. 3;
- t ——蒸发时间,单位为秒(s)。

表 E. 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/($m \cdot K$)	热扩散系数 α m^2/s
水泥	1. 1	$1. 29 \times 10^{-7}$
土地(含水 8%)	0. 9	$4. 3 \times 10^{-7}$
干涸土地	0. 3	$2. 3 \times 10^{-7}$
湿地	0. 6	$3. 3 \times 10^{-7}$
砂砾地	2. 5	$1. 1 \times 10^{-6}$

E. 1. 6. 3 质量蒸发

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。质量蒸发速率 Q_3 按下式计算:

$$Q_3 = \frac{apM}{(R \times T_0)} \times u^{(2-n)(2+n)} \times r^{\frac{4+n}{2+n}} \dots\dots\dots (E. 27)$$

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 E. 4;
- p ——液体表面蒸气压,单位为帕(Pa);
- R ——气体常数,单位为焦每摩开[J/($mol \cdot K$)];
- T_0 ——环境温度,单位为开(K);
- u ——风速,单位为米每秒(m/s);
- r ——液池半径,单位为米(m)。

表 E.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(E、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。

E.1.6.4 液体蒸发总量

液体蒸发总量按下式计算:

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

式中:

- W_p ——液体蒸发总量,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)。

E.2 闪蒸

E.2.1 闪蒸带走的气体量

液体中闪蒸部分:

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

过热液体闪蒸蒸发速率可按下式计算:

$$Q_1 = Q_L F_v \dots\dots\dots (E.30)$$

式中:

- F_v ——泄漏液体的闪蒸比例;
- T_T ——储存温度,单位为开(K);
- T_b ——泄漏液体的沸点,单位为开(K);
- H_v ——泄漏液体的蒸发热,单位为焦每千克(J/kg);
- C_p ——泄漏液体的定压热容,单位为千焦每千克开[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)。

E.2.2 闪蒸带走的液体量

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为

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

式中:
 D ——带到空气中的液体量,单位为千克每秒(kg/s);
 地面液池内液体量为

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

式中:
 D_s ——地面液池内的液体量,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。

E.3 泄漏物质在大气中的扩散

E.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 6 类,大气稳定度的具体分类见表 E.5 和表 E.6。

表 E.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 E.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

E.3.2 Pasquill-Gifford 模型扩散方程和扩散系数

E.3.2.1 Pasquill-Gifford 模型扩散方程

- 1) 位于地面 H_r 高处的连续稳态源的烟羽:

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

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)。

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中心,烟团中心在 $x=ut$ 处,平均浓度方程为

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

- 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/m³)；
- 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)。

E. 3. 2. 2 Pasquill-Gifford 模型扩散系数

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

表 E. 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 m)

Pasquill-Gifford 稳定度等级	σ_y m	σ_z m
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	$0.08x(1+0.0001x)^{-1/2}$	$0.06x(1+0.0015x)^{-1/2}$
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	$0.11x(1+0.0004x)^{-1/2}$	$0.08x(1+0.0015x)^{-1/2}$

表 E.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 m)

Pasquill-Gifford 稳定度等级	σ_y 或 σ_x m	σ_z m	Pasquill-Gifford 稳定度等级	σ_y 或 σ_x m	σ_z m
A	$0.18x^{0.92}$	$0.60x^{0.75}$	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	$0.02x^{0.89}$	$0.05x^{0.61}$

E.4 火灾和爆炸

E.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,可根据防护堤所围的液池面积 S 计算液池直径 D :

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

式中:

S ——液池面积,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,按下式计算最大的液池面积:

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

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)。

最小物料层厚度与地面性质对应关系见表 E.9。

表 E.9 最小物料层厚度与地面性质对应关系

地 面 性 质	最小物料层厚度 m
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	0.0018

b) 确定火焰高度:

计算池火火焰高度的经验公式如下:

$$L/D = 42 \times [m_f / (\rho_0 \sqrt{gD})]^{0.61} \dots\dots\dots (E.37)$$

式中:

L ——火焰高度,单位为米(m);

D ——液池直径,单位为米(m);

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

ρ_0 ——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,用下式计算火焰表面热通量:

$$q_0 = \frac{0.25\pi D^2 \Delta H_c m_f f_h}{0.25\pi D^2 + \pi DL} \quad \dots\dots\dots (\text{E. 38})$$

式中:

q_0 ——火焰表面热通量,单位为千瓦每平方米(kW/m^2);

ΔH_c ——燃烧热,单位为千焦每千克(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[$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$];

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

$$q(r) = q_0 (1 - 0.058 \ln r) F_p \quad \dots\dots\dots (\text{E. 39})$$

式中:

$q(r)$ ——目标接收到的热通量,单位为千瓦每平方米(kW/m^2);

r ——目标到泄漏中心的水平距离,单位为米(m);

F_p ——视角因子。

e) 视角系数的计算:

视角因子 F_p 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。

$$F_p = \sqrt{(F_{pH}^2 + F_{pV}^2)} \quad \dots\dots\dots (\text{E. 40})$$

$$\pi F_{pH} = A - B \quad \dots\dots\dots (\text{E. 41})$$

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

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

$$\pi F_{pV} = \tan^{-1} [h/(s^2 - 1)^{0.5}] / s + h(J - K)/s \quad \dots\dots\dots (\text{E. 44})$$

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

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

$$a = (h^2 + s^2 + 1)/(2s) \quad \dots\dots\dots (\text{E. 47})$$

$$b = (1 + s^2)/(2s) \quad \dots\dots\dots (\text{E. 48})$$

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 、 F_{pH} 、 F_{pV} ——描述方便而引入的中间变量。

E. 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:

火球直径按下式计算:

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

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:

火球持续时间按下式计算:

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

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) 目标接收到的热辐射通量的计算:

目标接收到的热辐射通量按下式计算:

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

式中:

q_0 ——火球表面的辐射通量,单位为瓦每平方米(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)。

E. 4. 3 喷射火计算

E. 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:

火焰长度按下式计算:

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

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数;

T_f ——燃烧火焰的绝热温度,单位为开(K);

T_j ——喷射流体的绝热温度,单位为开(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(g/mol);

M_f ——燃料的摩尔质量,单位为克每摩(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7~9之间。

b) 目标接收到的热辐射通量的计算按下式计算:

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

式中:

$q(r)$ ——距离 r 处目标接收到的热辐射通量,单位为千瓦每平方米(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,单位为千焦每千克(kJ/kg);

F_p ——视角因子。

大气传输率 τ_a 可按下式计算:

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

式中:

p_w ——大气中水蒸气的分压,单位为帕(Pa);

X_s ——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 可按下式计算:

$$p_w = 101325 \times RH \times e^{(14.4114 - \frac{5328}{T_a})} \quad \dots\dots\dots (E. 55)$$

式中:

RH ——相对湿度,单位为百分数(%);

T_a ——环境温度,单位为开(K)。

视角因子 F_p 可按下式计算:

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

式中:

r ——目标到火焰中心的距离,单位为米(m)。

E. 4. 3. 2 水平方向喷射火计算

E. 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。

E. 4. 3. 2. 2 喷射火的火焰长度可用如下方程得到:

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

式中:

L ——火焰长度,单位为米(m);

H_c ——燃烧热,单位为焦每千克(J/kg);

m ——质量流速,单位为千克每秒(kg/s)。

E. 4. 3. 2. 3 距离火焰点源为 X 处接收到的热辐射通量可用下式表示:

$$q = \frac{f H_c m \tau}{4\pi X^2 \times 1000} \quad \dots\dots\dots (E. 58)$$

式中:

q ——距离 X 处接收到的热辐射通量,单位为千瓦每平方米(kW/m²);

f ——热辐射率;

τ ——大气传输率。

大气传输率 τ 按下式计算:

$$\tau = 1 - 0.0565 \ln X \quad \dots\dots\dots (E.59)$$

对于喷射火热辐射计算,用户也可根据实际情况选择固体火焰模型。

E.4.4 蒸气云爆炸(TNO 模型)计算

E.4.4.1 TNO 方法计算步骤

- 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:
 - 拥挤的空间和建筑物(如工艺设备、平台和管架等);
 - 平行平面之间的空间(如汽车底部与地面之间等);
 - 管状结构内的空间(如隧道、桥梁及下水道系统等);
 - 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)等量的化学式燃料-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) 计算爆炸源的燃烧能:

$$E = V_{\text{爆炸源}} \times 3.5 \times 10^6 \quad \dots\dots\dots (E.60)$$

式中:

E ——爆炸源内等量的化学式燃料-空气混合物的燃烧能,单位为焦(J);

$V_{\text{爆炸源}}$ ——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:
 - 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;
 - 典型工艺单元,取4~9;
 - 最大爆炸源强度取10。
- f) 计算比拟距离 $\bar{R}$:

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

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(J);

p_0 ——环境大气压,单位为帕(Pa)。

- g) 计算爆炸超压:

查图 E.1 得到 Sachs 比拟爆炸超压 $\Delta \bar{p}_s$,爆炸超压按下式计算:

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

式中:

p ——爆炸超压,单位为帕(Pa);

$\Delta \bar{p}_s$ ——Sachs 比拟爆炸超压(无量纲)；
 p_0 ——环境大气压,单位为帕(Pa)。

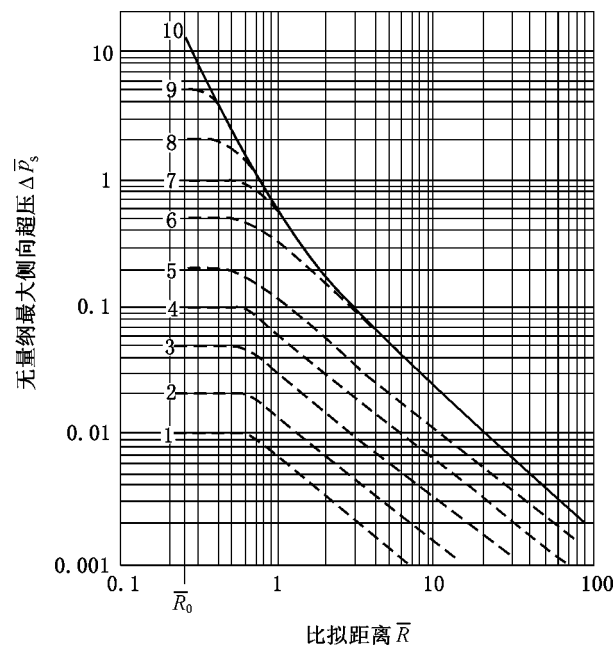


图 E.1 TNO 模型的 Sachs 比拟爆炸超压

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,具体方法参见参考文献 [10]。

E.4.4.2 爆炸源强度选择方法

E.4.4.2.1 定性方法可采用 Kinsella 方法,见表 E.10。

表 E.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	
	×	×			×		7~10
	×	×				×	7~10
×		×			×		5~7
	×		×		×		5~7
	×		×			×	4~6
	×			×	×		4~6
×		×				×	4~5
	×			×		×	4~5
×			×		×		3~5
×			×			×	2~3
×				×	×		1~2
×				×		×	1

E.4.4.2.2 确定爆炸源强度的定量方法参见参考文献[11]。

附 录 F
(资料性附录)

探测和隔离系统的判定及相应的泄漏时间

表 F.1 为探测和隔离系统分级指南,该表中给出的信息只在评价连续性泄漏时使用。

表 F.1 探测和隔离系统分级指南

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以外	B
外观检查、照相机,或带远距功能的探测器	C
隔离系统类型	隔离系统等级
直接在工艺仪表或探测器启动,而无须操作者干预的隔离或停机系统	A
操作者在控制室或远离泄放点的其他合适位置启动的隔离或停机系统	B
手动操作阀启动的隔离系统	C

通过对探测和隔离系统的分级,结合人因分析的结果,各孔径下的泄漏时间见表 F.2。

表 F.2 基于探测及隔离系统等级的泄漏时间

探测系统等级	隔离系统等级	泄漏时间
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 G
(资料性附录)
可燃物质释放事件树及点火概率

G.1 可燃物质释放事件树

G.1.1 可燃气体瞬时释放事件树

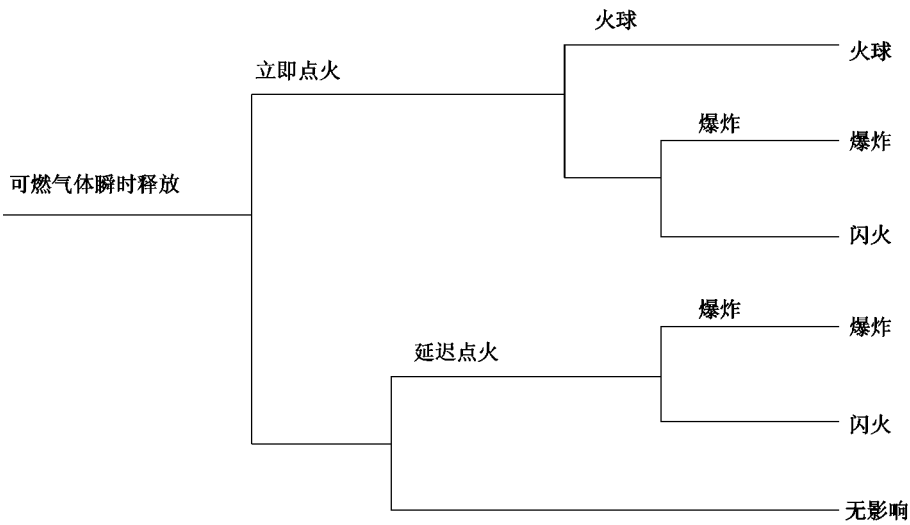


图 G.1 可燃气体瞬时释放事件树

G.1.2 可燃气体连续释放事件树

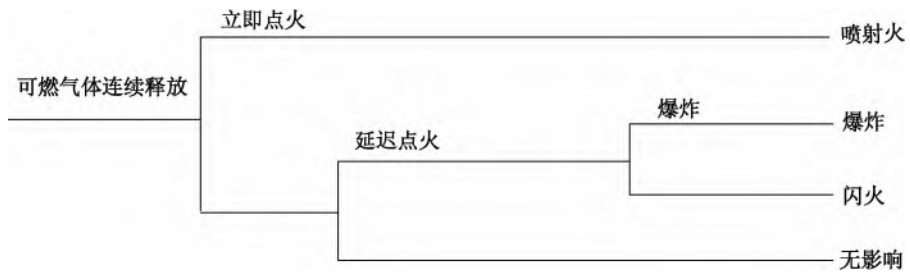


图 G.2 可燃气体连续释放事件树

G. 1.3 压缩液化气体瞬时释放事件树

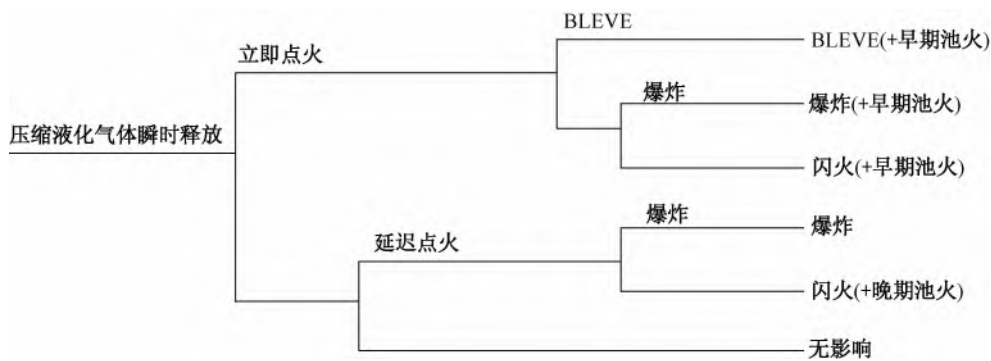


图 G.3 压缩液化气体瞬时释放事件树

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。

G. 1.4 压缩液化气体连续释放事件树

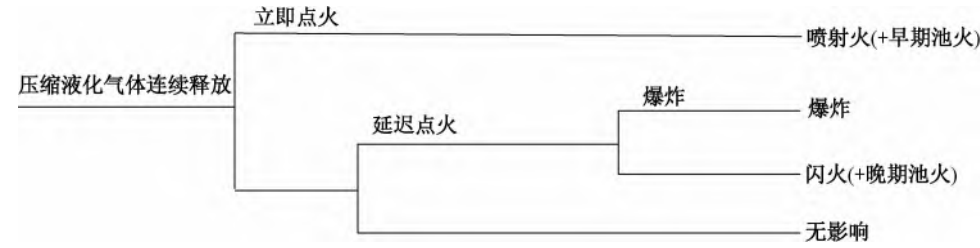


图 G.4 压缩液化气体连续释放事件树

G. 1.5 可燃液体释放事件树

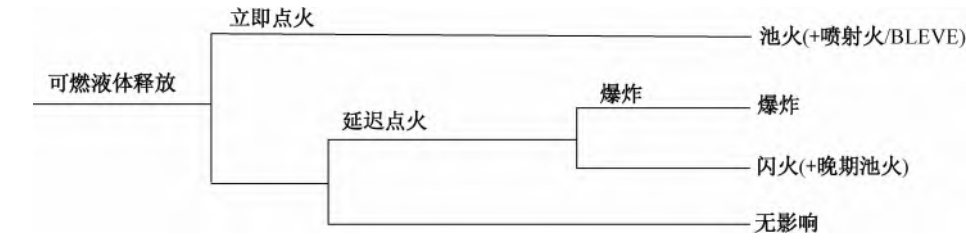


图 G.5 可燃液体释放事件树

注 1：对于可燃液体释放，在到达地面前可能发生物质的蒸发。如果蒸发气中液滴落下的比例小于 1 时，立即点火将形成喷射火（或 BLEVE）。喷射火（或 BLEVE）的物质质量取决于蒸发气中的物质质量。

注 2：在延迟点火时，除了闪火或爆炸，也将发生池火。

G.2 立即点火的点火概率

立即点火的点火概率与装置类型、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 G.1，企业内运输设备可燃物质泄漏后立即点火概率见表 G.2，可燃物质分类见表 G.3。

表 G.1 固定装置可燃物质泄漏后立即点火概率

物质类别	连续释放 kg/s	瞬时释放 kg	立即点火概率
类别 0(中/高活性)	<10	<1 000	0.2
	10~100	1 000~10 000	0.5
	>100	>10 000	0.7
类别 00(低活性)	<10	<1 000	0.02
	10~100	1 000~10 000	0.04
	>100	>10 000	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 G.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
	铁路槽车	连续释放	0.1
	铁路槽车	瞬时释放	0.8
	运输船	连续释放	0.5~0.7
类别 1	槽车、运输船	连续释放、瞬时释放	0.065
类别 2	槽车、运输船	连续释放、瞬时释放	0.01
类别 3、4	槽车、运输船	连续释放、瞬时释放	0

表 G.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<0℃, 沸点≤35℃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℃, 但不是极度易燃的液体
类别 2	可燃	21℃≤闪点≤55℃的液体
类别 3	可燃	55℃<闪点≤100℃的液体
类别 4	可燃	闪点>100℃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 G.4。

表 G.4 部分化学品活性分类

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

G.3 延迟点火的点火概率

延迟点火的点火概率应考虑点火源特性、泄漏组分以及点火源处于蒸气云团内的概率,可用如下关系式表示:

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

式中:

$P(t)$ —— $0 \sim t$ 时间内发生点火的概率;

P_{present} —— 当蒸气云经过时点火源存在的概率;

ω —— 点火效率,单位为每秒(s^{-1}),与点火源特性有关;

t —— 时间,单位为秒(s)。

点火效率可根据点火源在某一段时间内的点火概率计算得出,不同点火源在 1 min 内的点火概率见表 G.5。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。

表 G.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

表 G.5 点火源在 1 min 内的点火概率（续）

点 火 源	1 min 内的点火概率
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	0.2/100m
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
人口活动	
居民	0.01 /人
工人	0.01 /人
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: $d = NE/V \quad \dots\dots\dots (G.2)$ 式中: N——每小时通过的汽车数量,单位为每时(h^{-1}); E——道路或铁路的长度,单位为千米(km); V——汽车平均速度,单位为千米每时($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)。 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: $P(t) = d(1 - e^{-\omega t}) \quad \dots\dots\dots (G.3)$ 式中,ω 为单辆汽车的点火效率,单位为每秒(s^{-1})。 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 $P(t) = 1 - e^{-d\omega t} \quad \dots\dots\dots (G.4)$ 式中,ω 为单辆汽车的点火效率,单位为每秒(s^{-1})。 注 2: 对某个居民区而言,$0 \sim t$ 时间内的点火概率可由下式给出: $P(t) = 1 - e^{-n\omega t} \quad \dots\dots\dots (G.5)$ 式中,ω 为每个人的点火效率,单位为每秒(s^{-1}),n 为居民区中存在的平均人数。	

附 录 H
(资料性附录)
影响阈值

H.1 ERPGs 值

- a) ERPG-1:空气中的最高浓度低于该值就可以认为,几乎所有人都能暴露于其中 1h,除了轻微的短暂的有害于健康的影响,或明显感觉到令人讨厌的气味,而没有其他影响。
- b) ERPG-2:空气中的最高浓度低于该值就可以认为,几乎所有人都能暴露于其中 1h,不会逐步显示出不可逆或其他严重的健康影响,或者削弱他们采取防护行动的能力。
- c) ERPG-3:空气中的最高浓度低于该值就可以认为,几乎所有人都能暴露于其中 1h,不会逐步显示出危及生命健康的影响。

表 H.1 给出应急响应计划指南。

表 H.1 应急响应计划指南(ERPGs)(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	乙硼烷	NA	1	3
丙烯醛	0.1	0.5	3	双烯酮	1	5	50
丙烯酸	2	50	750	二甲胺	1	100	500
丙烯腈	NA	35	75	二甲基氯硅烷	0.8	5	25
烯丙基氯	3	40	300	二甲基二硫醚	0.01	50	250
氨	25	200	1 000	表氯醇	2	20	100
苯	50	150	1 000	环氧乙烷	NA	50	500
氯苯	1	10	25	甲醛	1	10	25
溴	0.2	1	5	六氯丁二烯	3	10	30
1,3-丁二烯	10	50	5 000	六氟丙酮	NA	1	50
丙烯酸丁酯	0.05	25	250	六氟环丙烷	10	50	500
异氰酸丁酯	0.01	0.05	1	氯化氢	3	20	100
二硫化碳	1	50	500	铍	NA	25 mg/m ³	100 mg/m ³
四氯化碳	20	100	750	三氟化硼	2 mg/m ³	30 mg/m ³	100 mg/m ³
氯气	1	3	20	氰化氢	NA	10	25
三氟化氯	0.1	1	10	氟化氢	2	20	50
氯乙酰氯	0.1	1	10	硫化氢	0.1	30	100
三氯硝基甲	NA	0.2	3	异丁腈	10	50	200
氯磺酸	2 mg/m ³	10 mg/m ³	30 mg/m ³	2-异丙基丙烯 酸酐乙酯	NA	0.1	1
三氟氯乙烯	20	100	300				
2-丁烯醛	2	10	50	氢化锂	25 μg/m ³	100 μg/m ³	500 μg/m ³

表 H.1 应急响应计划指南(ERPGs)(除非注明,所有值的单位均为 10^{-6}) (续)

化学物质	ERPG-1	ERPG-2	ERPG-3	化学物质	ERPG-1	ERPG-2	ERPG-3
甲醇	200	1 000	5 000	氯甲基甲醚	NA	1.0	10
氯甲烷	NA	400	1 000	硝基三氯甲烷	0.1	0.3	1.5
二氯甲烷	200	750	4 000	氯化氰	NA	0.4	4
异氰酸甲酯	0.025	0.5	5	1,2-二氯乙烷	50	200	300
甲硫醇	0.005	25	100	2,4-二氯酚	0.2	2	20
甲基三氯硅烷	0.5	3	15	二聚环戊二烯	0.01	5	75
一甲胺	10	100	500	1,1-二氟乙烷	10 000	15 000	25 000
全氟异丁烯	NA	0.1	0.3	二乙烯酮	1	5	20
苯酚	10	50	200	N,N-二甲基 甲酰胺	2	100	200
光气	NA	0.2	1				
五氧化二磷	5 mg/m ³	25 mg/m ³	100 mg/m ³	二甲硫醚	0.5	1 000	5 000
环氧丙烷	50 mg/m ³	250 mg/m ³	750 mg/m ³	3-氯-1,2- 环氧丙烷	5	20	100
苯乙烯	50	250	1 000				
磺酸	2	10	30	丙烯酸乙酯	0.01	30	300
二氧化硫	0.3	3	15	氯甲酸乙酯	ID	5	10
四氟乙烯	200	1 000	10 000	异辛醇	0.1	100	200
四氯化钛	5 mg/m ³	300 mg/m ³	1 000 mg/m ³	氟	0.5	5	20
甲苯	50	300	1 000	氯磺酸	2 mg/m ³	10 mg/m ³	30 mg/m ³
三甲胺	0.1	100	500	呋喃甲醛	2	10	100
六氟化溴	5 mg/m ³	15 mg/m ³	30 mg/m ³	戊二醛	0.2	1	5
乙酸乙烯酯	5	75	500	六氟-1,3- 丁二烯	1	3	10
乙酸	5	35	250				
乙酸酐	0.5	15	100	六氟丙烯	10	50	500
3-氯丙烯	3	40	300	1-己烯	NA	500	5 000
砷化氢	NA	0.5	1.5	三氯乙烯	100	500	5 000
苯甲酰氯	0.3	5	20	三甲基氯硅烷	3	20	150
二氯甲醚	ID	0.1	0.5	乙烯三氯硅烷	0.5	5	50
无水肼	0.5	5	30	八氧化三铀	ID	10 mg/m ³	50 mg/m ³
乙酸丁酯	5	200	3 000	六氟化铀	5 mg/m ³	15 mg/m ³	30 mg/m ³
丁基异氰酸酯	0.01	0.05	1	三乙氧基硅烷	0.5	4	10
一氧化碳	200	350	500	甲苯-2,4(2,6-) 二异氰酸酯	0.01	0.15	0.6
二氧化氯	NA	0.5	3				
一氯二氟乙烷	10 000	15 000	25 000	异戊二烯	5	1 000	4 000
三氟甲烷	NA	50	5 000	二乙基苯	10	100	500

表 H.1 应急响应计划指南(ERPGs)(除非注明,所有值的单位均为 10^{-6}) (续)

化学物质	ERPG-1	ERPG-2	ERPG-3	化学物质	ERPG-1	ERPG-2	ERPG-3
1,1,1,2-四氟-2-氯乙烷	1 000	5 000	10 000	四氯化硅	0.75	5	37
邻氯苯叉缩丙二腈	0.005 mg/m ³	0.1 mg/m ³	25 mg/m ³	氢氧化钠	0.5 mg/m ³	5 mg/m ³	50 mg/m ³
				锑化氢	ID	0.5	1.5
盐酸	3	20	150	正硅酸乙酯	25	100	300
氢氰酸	NA	15	25	四氢呋喃	100	500	5 000
过氧化氢	10	50	100	正硅酸甲酯	NA	10	20
硒化氢	NA	0.2	2	氯化亚砷	0.2	2	10
氯甲酸异丙酯	ID	5	20	1,1,1-三氯乙烷	350	700	3 500
碘	0.1	0.5	5	三氯硅烷	1	3	25
顺丁烯二酸酐	0.2	2	20	氯乙烯	500	5 000	20 000
汞	NA	0.25	0.5	1,1-二氯乙烯	ID	500	1 000
溴甲烷	NA	50	200	二氧化铀	ID	10 mg/m ³	30 mg/m ³
氯甲酸甲酯	NA	2	5	三氧化铀	ID	0.5 mg/m ³	3 mg/m ³
甲基异氰酸酯	0.025	0.25	1.5	三甲氧基甲硅烷	0.5	2	5
二苯甲撑二异氰酸酯	0.2 mg/m ³	2 mg/m ³	25 mg/m ³	甲基丙烯酸异氰基乙酯	ID	0.1	1
硝酸	1	6	78	2,2-二氯-1,1,1-三氟乙烷	ID	1 000	10 000
二氧化氮	1	15	30	四羟基氢化钴	ID	0.13	0.42
三氟化氮	NA	400	800	氯乙酰氯	0.05	5	10
1-辛烯	40 ^a	800 ^b	2 000	亚乙基降冰片烯	0.02	100	500
四氯乙烯	100	200	1 000				
磷化氢	NA	0.5	5				
三氯化磷	0.5	3	15				
注 1: NA 表示尚未分析, ID 表示数据不充分。 注 2: a: 表示 25% 的最低爆炸下限; b: 表示 10% 的最低爆炸下限。 注 3: 上述物质的 ERPG 数值由美国工业卫生协会 2008 年 1 月 1 日公布, ERPG 值定期更新, 宜使用最新的 ERPG 值。							

H.2 热辐射

表 H.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(10 s) 100%死亡(1 min)

表 H.2 不同热辐射强度造成的伤害和损坏（续）

热辐射强度 kW/m ²	对设备的损坏	对人的伤害
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(10 s) 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

H.3 超压

表 H.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
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

表 H.3 超压对建筑物的影响(近似值)(续)

压力 kPa	影 响
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 I
(规范性附录)

死亡概率与概率值对应关系及物质毒性常数

I.1 P_d 和 P_r 的对应关系

表 I.1 P_d 和 P_r 的对应关系

P %	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

I.2 常用物质的毒性常数

表 I.2 常用物质的毒性常数 a 、 b 、 n

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
二氧化碳	—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
氰化氢	—9.8	1	2.4	四乙基铅	—9.8	1	2

参 考 文 献

- [1] Center for Chemical Process Safety of American Institute of Chemical Engineering. Guidelines for chemical process quantitative risk analysis[M]. 2nd ed. New York: AICHE, 2000.
- [2] UIJT DE HAAG P A M, ALE B J M. Guidelines for quantitative risk assessment (Purple Book)[M]. The Hague(NL): Committee for the Prevention of Disasters, 2005.
- [3] National Institute of Public Health and the Environment(RIVM). Reference manual bevi risk assessments introduction[M]. Bilthoven, the Netherlands, 2009.
- [4] VAN DEN BOSCH C J H, WETERINGS R A P M. Methods for calculation of physical effects (Yellow Book) [M]. Netherlands, 2005.
- [5] ROOS A J. Methods for the determination of possible damage (Green Book) [M]. Netherlands, 1992.
- [6] American Institute of Chemical Engineering. Guidelines for evaluation the characteristics of vapor cloud explosions, flash fires, and BLEVES[M]. New York, 1994.
- [7] PHILIP L, WILLIAMS, JAMES L, et al. Industrial toxicology: safety and health applications in the workplace[M]. New York: Van Nostrand Reinhold, 1985.
- [8] DANIEL A, CROWL, JOSEPH F, et al. Chemical process safety fundamentals with applications[M]. 2nd ed. Prentice Hall PTR, 2002.
- [9] CLANCEY V J. Diagnostic features of explosion damage, the Sixth International Meeting of Forensic Sciences[C]. Edinburgh, 1972.
- [10] VAN DEN BERG A C, MOS A L. Research to improve guidance on separation distance for the multi-energy method (RIGOS)[M]. TNO Prins Maurits Laboratory, 2005.
- [11] MERCX W P M, VAN DEN BERG A C, VAN LEEUWEN D. Application of correlations to quantify the source strength of vapour cloud explosions in realistic situations[M]. TNO Prins Maurits Laboratory, 1998.
- [12] 李美庆. 安全评价员实用手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.
- [13] 国家安全生产监督管理总局. 安全评价[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2005.
-