

DB32

江苏省地方标准

DB32/T 4745—2024

化工装置事故多米诺效应
风险评估导则

Directives for risk assessment of domino effect on accidents of
chemical plants

地方标准信息服务平台

2024-04-26 发布

2024-05-26 实施

江苏省市场监督管理局 发布
中国标准出版社 出版

目 次

前言Ⅲ

1 范围1

2 规范性引用文件1

3 术语和定义1

4 风险评估程序2

5 多米诺效应风险评估内容3

6 评价报告编制5

附录A（资料性） 数据资料收集6

附录B（规范性） 危险度评价法7

附录C（规范性） 装置清单9

附录D（规范性） 事故后果计算10

附录E（资料性） 同类设备（设施）典型泄漏场景泄漏频率值16

参考文献18

地方标准信息服务平台

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由江苏省应急管理厅提出并组织实施。

本文件由江苏省安全生产标准化技术委员会归口。

本文件起草单位：江苏省安全生产科学研究院、南京工业大学、南京江北新材料科技园、江苏中安科技服务有限公司、江苏国恒安全评价咨询服务有限公司、南京南工应急科技有限公司。

本文件主要起草人：朱桂明、王晓明、蒋军成、吴菲、张明广、王强、谭涛、张彬、张平、于涛、张华、戴相禄、蔡琢、许亮、朱俊杰、朱晓玉、张峰、潘文洁。

地方标准信息服务平台

化工装置事故多米诺效应 风险评估导则

1 范围

本文件规定了化工装置多米诺效应风险评估的基本程序、评估内容和评估报告编制要求。

本文件适用于生产、储存及使用易燃易爆危险化学品的化工装置初始事故(火灾或爆炸)引发邻近装置次生事故多米诺效应风险评估。本文件仅考虑化工装置间的第一级多米诺效应。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件;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/T 34708 化学品风险评估通则

GB/T 37243 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

GB 50160 石油化工企业设计防火标准

GB 50089 民用爆炸物品工程设计安全标准

危险化学品生产建设项目安全风险防控指南(试行)(应急〔2022〕52号)

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

化工装置 chemical plant

用于生产化工产品的设备系统,通常为一个或一个以上相互关联的工艺单元的组合。

注:本文件中特指涉及易燃易爆危险化学品的反应器、压力容器、换热器、储罐、泵、压缩机等生产装置和储存设施。

[来源:GB 50160—2008,2.0.12,有修改]

3.2

化工装置事故多米诺效应 domino effect on accidents of chemical plants

化工装置初始事故(火灾或爆炸)产生热辐射、超压、碎片等破坏效应,作用于周边装置引发多个次生事故(火灾、爆炸),次生事故的破坏效应在具体环境下相互耦合引发更深层次事故,生成多条事故链的现象。

3.3

风险 risk

发生特定危害事件的可能性与后果严重性的结合。

[来源:AQ/T 3034—2013,3.2]

3.4

风险评估 risk assessment

对某一装置设施或作业活动中发生事故频率和后果进行分析,并与风险可接受标准进行比较的系统分析方法,通常通过个人风险和社会风险两类指标进行表征。

[来源:AQ/T 3046—2013,3.7,有修改]

4 风险评估程序

化工装置事故多米诺效应风险评估程序,见流程图 1。

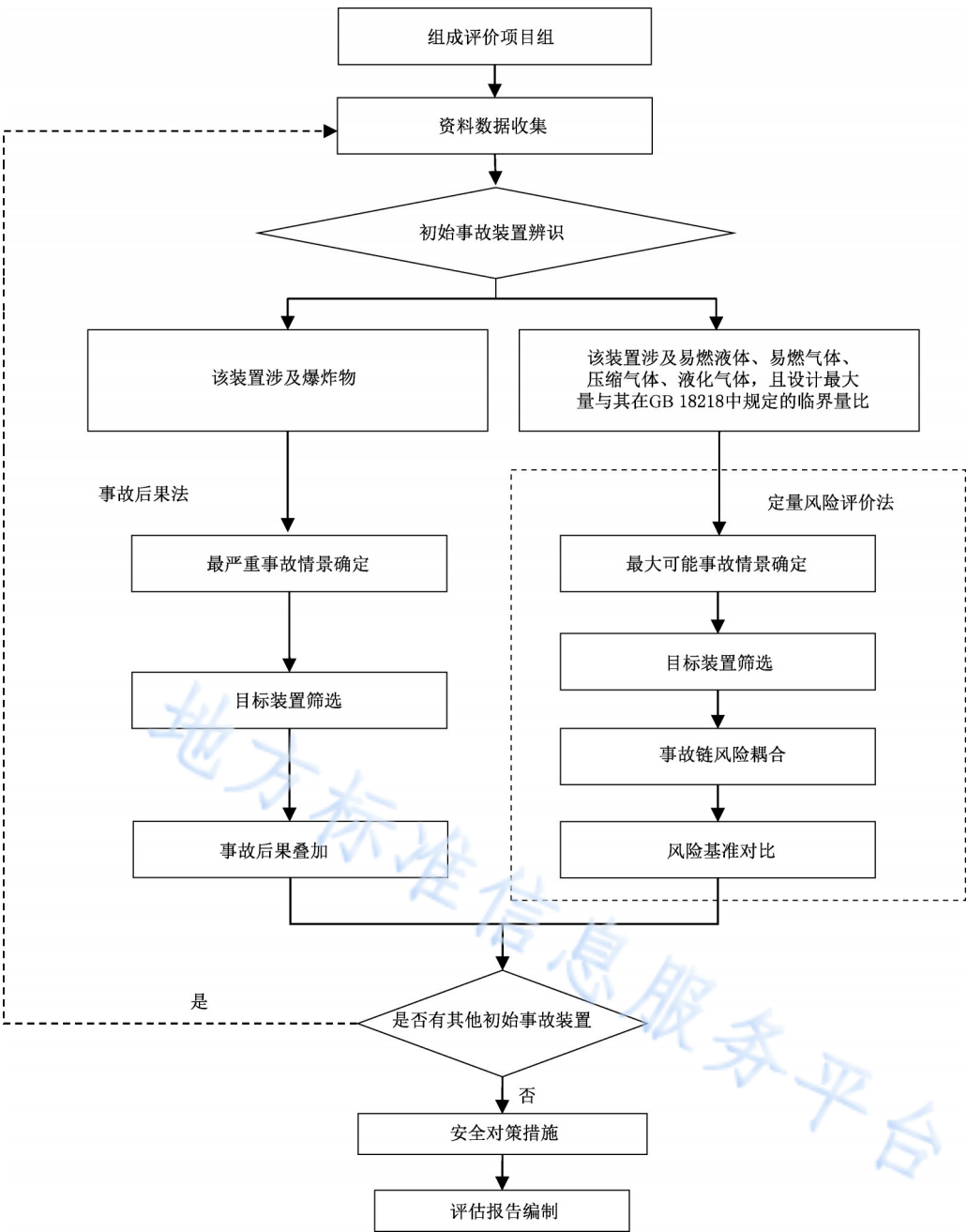


图1 化工装置事故多米诺效应风险评估程序图

5 多米诺效应风险评估内容

5.1 数据资料收集

成立评价项目组,项目组成员不应少于4人,专业应至少涵盖总图设计、工艺、设备、安全管理等。应根据评价目标装置区域确定所需收集的数据资料,包括但不限于附录A。

5.2 初始事故装置辨识

采用危险度评价法(按照附录B)对带压管道、固定的带压容器和储罐、固定的常压容器和储罐、泵和压缩机、换热器、压力释放装置等设备(设施)进行初步评估排序后,按附录C给出的清单格式编制初始事故装置清单。储存爆炸物的仓库则直接列入初始事故装置清单。

若装置涉及爆炸物,则采用事故后果法分析事故后果;否则采用定量风险评价法分析风险。

5.3 事故后果法

5.3.1 最严重事故情况确定

辨识装置或设施(仓库)内涉及爆炸物的单元,应按照GB 50089的要求,确定装置或设施(仓库)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场景作为最严重事故情景,不考虑装置反应爆炸。

5.3.2 目标装置筛选

根据最严重事故情景以及附录D中公式(D.28)爆炸事故后果计算模型,按照D.1.6计算多米诺事故半径,筛选出多米诺事故半径内的目标装置。

应按照表D.2中各类目标装置在超压作用下的破坏条件概率单位公式,按照公式(D.30)计算目标装置的破坏概率。将破坏条件概率单位大于70%的目标装置列入最终目标装置清单。

5.3.3 事故后果叠加

选取事故造成人员死亡概率为50%的半径作为死亡半径,按照附录D计算火灾、爆炸事故后果的死亡半径。将初始事故及目标装置次生事故的死亡半径进行事故后果空间上综合叠加。

5.4 定量风险评价法

5.4.1 发生频率

发生频率参照以下数据来源:

- 工业失效数据库,泄漏场景与失效数据场景基本假设相一致;
- 企业历史数据,历史数据充足并具有统计意义;
- 供应商的数据,谨慎使用;
- 基于可靠性的失效概率模型;
- 同类设备(设施)典型泄漏场景泄漏频率值参见附录E中表E.1~表E.7。

5.4.2 最大可能事故情景确定

最大可能事故按照GB/T 37243与GB 18218应同时满足以下两个条件:

- 设备发生最大可能事故情景的泄漏频率 $\geq 10^{-6} \text{ a}^{-1}$;

- b) 涉及易燃液体、易燃气体和压缩气体、液化气体的化工装置,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 的应采用定量风险评价方法;上述物质以外的化工装置参照采用定量风险评价方法。

5.4.3 目标装置筛选

根据初始最大可能事故情景以及公式(D.1)、公式(D.15)、公式(D.18)、公式(D.23),按照 D.1.6 计算多米诺事故半径,筛选多米诺事故半径内的各类目标装置。

应按照表 D.2 中各类目标装置在热辐射和超压作用下的破坏条件概率单位公式和公式(D.30)计算目标装置的破坏概率,形成以初始事故装置事故为源头,最终目标装置次生事故为终点的多条事故链。

5.4.4 事故链风险耦合

针对初始事故和次生事故构成的多条事故单链^[5],按照公式(D.31)计算每条事故单链上最终目标装置或设备(设施)的破坏概率,计算初始事故和次生事故风险耦合下个人风险和社会风险。

5.4.5 风险基准对比

事故周边的最终目标装置或设备(设施)所承受的个人风险,宜按照 GB 36894 的个人风险基准判定风险是否可接受。

5.5 安全对策措施

根据筛选的初始事故装置以及最大可能事故的情景,确定事故后果影响及多米诺效应影响的目标装置,采取以下安全对策措施,包括但不限于:

- a) 优化生产工艺。研究并优化生产工艺,改变工艺路线或优化反应条件,提升工艺本质安全。
- b) 优化自动化控制措施。采取自动化控制、紧急切断、紧急停车、安全联锁、检测报警等控制方案和安全管控措施,提高设备安全可靠。
- c) 降低储量。降低主要生产装置的在线量、储存设施的储存量。
- d) 优化建(构)筑物安全设施。依据国家相关法律法规和标准规范中建(构)筑物火灾危险性分类、耐火等级、防爆、抗震、层数、面积、防火分区、安全出口及安全疏散距离的要求,设置必要的防火、泄爆、抗爆、防腐、耐火保护、通风、排烟、除尘、降温等安全设施。
- e) 优化装置或设备防护措施。采取隔热、喷淋等措施降低热辐射破坏效应;采取泄压、隔爆、泄爆、自动抑爆等措施降低超压冲击波破坏效应。
- f) 优化消防救援及应急处置。优化消防站的车辆、消防器材、个人防护装备配备;新建、待建企业优化消防给水系统、消防水源、消防管网布置、消防泵房及消防泵设置、消防水池(罐)、各类灭火系统、冷却设施、灭火器配置、灭火药剂及其储存等的设计。
- g) 优化定岗定员。涉及硝化、加氢、氯化、氟化、重氮化、过氧化等的生产车间(区域),涉及易燃易爆、毒性气体、毒性粉尘、爆炸性粉尘的作业现场或厂房,应按照《危险化学品生产建设项目安全风险防控指南(试行)》的要求优化定岗定员。
- h) 优化总平面布置。新建企业从防火间距、功能分区、最小频率风向等方面优化化工装置的布局,从防火间距、主导风向等方面优化总平面布置中消防泵房、消防站的位置。

6 评价报告编制

6.1 评价报告主要内容

评估报告应包括但不限于以下内容：

- a) 概述,包含评估目的、评估范围及评估依据；
- b) 化工装置概况；
- c) 初始事故装置辨识；
- d) 最严重事故情景或最大可能事故情景选取；
- e) 目标装置筛选；
- f) 事故后果叠加或事故链风险耦合和风险基准对比；
- g) 判定事故后果及多米诺效应；
- h) 安全对策措施；
- i) 评估结论。

6.2 评价报告要求

评估报告的内容应简洁、准确,评估过程科学、规范。

6.3 评价报告附件

评估报告附件应包括但不限于以下内容：

- a) 化工企业总平面布置图、初始事故装置分布图、多米诺效应影响范围图、事故后果范围图、重大危险源分布图、消防安全重点单位分布图、风险源四色等级分布图、应急避难场所分布图等；
- b) 被评估化工企业提供的原始资料目录或复制件等；
- c) 其他。

6.4 评估报告格式

评估报告格式一般包括：

- a) 封面；
- b) 目录；
- c) 前言；
- d) 正文；
- e) 附件及附录。

附 录 A
(资料性)
数据资料收集

数据资料收集见表 A.1。

表 A.1 数据资料收集

类别	数据收集
危害信息	爆炸物、易燃液体、易燃气体及压缩液化气体物质存量、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(HAZAP)]结果、点火源等
设计和运营数据	安全规划、安全设计、区域位置图、平面布置图、技术说明、工艺技术程序、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
减缓控制系统	探测和隔离系统、联锁切断等(可燃气体和有毒气体检测、火焰探测、电视监控)、消防、水幕等减缓控制系统
管理系统	管理制度(设备完好性管理制度、本质安全设计、采购、制造、安装质量控制、运行维护、检验和测试、预防性维护、缺陷管理、泄漏管理、数据库管理)、操作和维修手册、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、各设备(设施)典型泄漏场景泄漏频率值(见附录E)
材料信息	制造各设备(设施)所用材料性能资料
人口数据	评价范围内人口分布
风险基准	区域内防护目标个人、社会风险基准
应急预案	企业、园区内事故应急救援预案

附 录 B

(规范性)

危险度评价法

危险度评价法是以各设备(设施)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设备(设施)的危险程度等级。危险度评价取值表见表B.1。危险度分级见表B.2。

表 B.1 危险度评价取值表

工程指标	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 及以上; 2.液体在100 m ³ 及以上	1.气体在500 m ³ ~1 000 m ³ (不包括1 000 m ³); 2.液体在50 m ³ ~100 m ³ (不包括100 m ³)	1.气体在100 m ³ ~500 m ³ (不包括500 m ³); 2.液体在10 m ³ ~50 m ³ (不包括50 m ³)	1.气体<100 m ³ ; 2.液体<10 m ³
温度	1 000 ℃及以上使用,其操作温度在燃点以上	1.1 000 ℃及以上使用,但操作温度在燃点以下; 2.在250 ℃~1 000 ℃(不包括1 000 ℃)使用,其操作温度在燃点以上	1.250 ℃~1 000 ℃(不包括1 000 ℃)使用,但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及以上	20 MPa~100 MPa(不包括100 MPa)	1 MPa~20 MPa(不包括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) 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 物质火灾危险性分类按GB 50160中可燃物质的火灾危险性分类确定。 ^b 见HG/T 20660—2017表1、表2、表3。 ^c 有触媒的反应,去掉触媒所占空间;气液混合反应,按其反应的气相选择上述规定。				

表 B.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

选择总分值≥11分的设备(设施)进行评估。

地方标准信息服务平台

附 录 C
(规范性)
装置清单

初始事故装置清单和目标装置清单分别见表 C.1 和表 C.2。

表 C.1 初始事故装置清单

序号	设备(设施)种类	类别
1	管道	初始事故装置
2	固定的带压容器和储罐	初始事故装置
3	固定的常压容器和储罐	初始事故装置
4	泵和压缩机	初始事故装置
5	换热器	初始事故装置
6	压力释放装置	初始事故装置
7	储存爆炸物的仓库	初始事故装置
注：固定的带压容器和储罐分为以下三类。 a) 带压容器：内部绝对压力大于0.1 MPa的储存容器。例如分液罐、压力储罐等。 b) 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，则它作为一个带压容器(不包括具有管程和壳程结构的换热器)。例如蒸馏塔、过滤器等。 c) 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，则该容器也作为一个反应容器。例如通用反应器、釜式反应器、床式反应器等。		

表 C.2 目标装置清单

序号	设备(设施)种类	类别
1	管道	目标装置
2	固定的带压容器和储罐	目标装置
3	固定的常压容器和储罐	目标装置
4	泵和压缩机	目标装置
5	换热器	目标装置
6	压力释放装置	目标装置
7	储存爆炸物的仓库	目标装置
注：固定的带压容器和储罐分为以下三类。 a) 带压容器：内部绝对压力大于0.1 MPa的储存容器。例如分液罐、压力储罐等。 b) 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，则它作为一个带压容器(不包括具有管程和壳程结构的换热器)。例如蒸馏塔、过滤器等。 c) 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，则该容器也作为一个反应容器。例如通用反应器、釜式反应器、床式反应器等。		

附 录 D
(规范性)
事故后果计算

D.1 源项事故后果范围计算

D.1.1 池火

池火火焰的几何尺寸及热辐射参数计算执行公式(D.1)~公式(D.14)。

$$q(r) = q_0(1 - 0.058 \ln r) V \quad \text{.....(D.1)}$$

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

$$\frac{L}{D} = 42 \times [m_f \div (\rho_0 \sqrt{gD})]^{0.61} \quad \text{.....(D.3)}$$

$$D = \left(\frac{4S}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{.....(D.4)}$$

$$S = W / (H_{\min} \times \rho) \quad \text{.....(D.5)}$$

$$V = \sqrt{V_v^2 + V_H^2} \quad \text{.....(D.6)}$$

$$\pi V_H = A - B \quad \text{.....(D.7)}$$

$$A = \frac{(b-1)/s}{\sqrt{b^2-1}} \arctan \sqrt{\frac{(b+1)(s-1)}{(b-1)(s+1)}} \quad \text{.....(D.8)}$$

$$B = \frac{(a-1)/s}{\sqrt{a^2-1}} \arctan \sqrt{\frac{(a+1)(s-1)}{(a-1)(s+1)}} \quad \text{.....(D.9)}$$

$$\pi V_v = \arctan [h/(s^2-1)^{0.5}] / s + h(J-K)/s \quad \text{.....(D.10)}$$

$$J = \left[\frac{a}{(a^2-1)^{0.5}} \right] \arctan \left[\frac{(a+1)(s-1)}{(a-1)(s+1)} \right]^{0.5} \quad \text{.....(D.11)}$$

$$K = \arctan [(s-1)/(s+1)]^{0.5} \quad \text{.....(D.12)}$$

$$a = \frac{h^2 + s^2 + 1}{2s} \quad \text{.....(D.13)}$$

$$b = \frac{1 + s^2}{2s} \quad \text{.....(D.14)}$$

式中：

r ——目标装置到火焰中心的距离,单位为米(m);

q_0 ——火焰表面的热通量,单位为千瓦每平方米(kW/m²);

$q(r)$ ——目标装置接收到的热通量,单位为千瓦每平方米(kW/m²);

D ——液池直径,单位为米(m);

S ——防火堤所围面积,单位为平方米(m²);

W ——泄漏液体质量,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);
- L ——火焰高度,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);
- 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;
- V ——视觉系数;
- s ——目标装置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;
- $A、B、J、K、V_H、V_V$ ——引入的中间变量。

D.1.2 沸腾液体扩展蒸气云爆炸(BLEVE)

沸腾液体扩展蒸气云爆炸热辐射模型计算执行公式(D.15)~公式(D.17)。

$$q(r) = \frac{q_0 R^2 r (1 - 0.058 \ln r)}{(R^2 + r^2)^{3/2}} \dots\dots\dots (\text{D.15})$$

$$R = 2.9 W^{1/3} \dots\dots\dots (\text{D.16})$$

$$t = 0.45 W^{1/3} \dots\dots\dots (\text{D.17})$$

式中:

- r ——目标装置到火球中心的平均距离,单位为米(m)。
- $q(r)$ ——目标装置接收到的热通量,单位为千瓦每平方米(kW/m^2);
- q_0 ——火焰表面的热通量,单位为千瓦每平方米(kW/m^2);柱形罐取 $270 \text{ W}/\text{m}^2$,球形罐取 $200 \text{ W}/\text{m}^2$;
- 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);单罐存储,取罐容量的50%;双罐存储,取罐容量的70%;多罐存储,取罐容量的90%;
- t ——火球持续时间,单位为秒(s)。

D.1.3 喷射火

喷射火热辐射通量模型计算执行公式(D.18)~公式(D.21)。

$$q(r) = \tau_a \eta \dot{m} \Delta H_c F_p \dots\dots\dots (\text{D.18})$$

$$\tau_a = 2.02 \times (p_w X_s)^{-0.09} \dots\dots\dots (\text{D.19})$$

$$p_w = 101\,325 \times \text{RH} \times e^{\left(\frac{14.4114 - \frac{5.328}{T_1}}{T_1}\right)} \dots\dots\dots (\text{D.20})$$

$$F_p = \frac{1}{4\pi r^2} \dots\dots\dots (\text{D.21})$$

式中:

- $q(r)$ ——目标装置接收到的热通量,单位为千瓦每平方米(kW/m^2);
- τ_a ——大气传输率;
- η ——热辐射系数;
- $\dot{m}$ ——燃料质量流速,单位为千克每秒(kg/s);

ΔH_c —— 燃烧热,单位为千焦每千克(kJ/kg);
 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);
RH —— 相对湿度,%;
 T_1 —— 环境温度,单位为开尔文(K);
 F_p —— 视角因子;
 r —— 目标装置到火焰中心的距离,单位为米(m)。

D.1.4 蒸气云爆炸(TNO)

蒸气云爆炸计算执行公式(D.22)~公式(D.24)。

$$E = V_s \times 3.5 \times 10^6 \quad \dots\dots\dots (D.22)$$

$$\bar{R} = \frac{r}{(E/p_0)^{1/3}} \quad \dots\dots\dots (D.23)$$

$$\Delta p = \Delta \bar{p}_s p_0 \quad \dots\dots\dots (D.24)$$

式中:

E —— 爆炸源内燃料-空气混合物的燃烧能,单位为焦(J);
 V_s —— 爆炸源中燃料-空气混合物体积,单位为立方米(m³);
 $\bar{R}$ —— 爆炸源的 Sachs 比拟距离(无量纲);
 r —— 目标装置到爆炸源中心的距离,单位为米(m);
 Δp —— 爆炸超压值,单位为帕(Pa);
 p_0 —— 环境大气压,单位为帕(Pa);
 $\Delta \bar{p}_s$ —— Sachs 比拟爆炸超压(无量纲),见图 D.1。

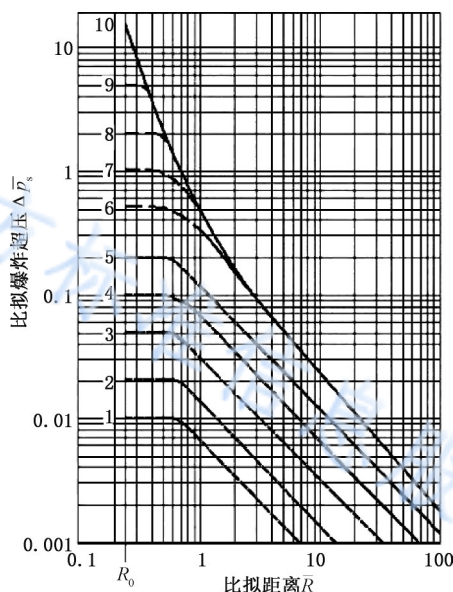


图 D.1 TNO 模型的 Sachs 比拟超压

D.1.5 TNT 当量爆炸模型

爆炸物发生爆炸情景时目标装置到爆炸点的距离计算执行公式(D.25)和公式(D.26)。

$$W_{\text{TNT}} = \frac{E_g}{4\,500} \dots\dots\dots (D.25)$$

$$\Delta p = 14 \frac{W_{\text{TNT}}}{r^3} + 4.3 \frac{W_{\text{TNT}}^{2/3}}{r^2} + 1.1 \frac{W_{\text{TNT}}^{1/3}}{r} \dots\dots\dots (D.26)$$

压力容器产生物理爆炸的能量计算执行公式(D.27)。

$$E_g = \frac{pV}{(k-1)} \left[1 - \left(\frac{0.1013}{p} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \times 10^3 \dots\dots\dots (D.27)$$

- 式中：
- E_g —— 气体的爆破能量,单位为千焦(kJ)；
 - p —— 容器内气体的绝对压力,单位为兆帕(MPa)；
 - V —— 容器的容积,单位为立方米(m³)；
 - k —— 气体的绝热指数,空气取值1.4。
 - Δp —— 冲击波超压值,10⁵Pa；
 - Q —— 一次爆炸的TNT当量,单位为千克(kg)；
 - r —— 目标装置到爆炸点的距离,单位为米(m)。
- 采用公式(D.28)和表D.1结合进行多米诺事故半径计算。

$$R_0 = \frac{r}{\sqrt[3]{W_{\text{TNT}}/1\,000}} \dots\dots\dots (D.28)$$

- 式中：
- W_{TNT} —— TNT当量,单位为千克(kg)；
 - R_0 —— 比拟距离,单位为米(m)；
 - r —— 实际距离,单位为米(m)。

表 D.1 1 000 kg TNT 爆炸时的冲击波超压

R_0/m	5	6	7	8	9	10	12	14
超压 p/kPa	2940	2060	1670	1270	950	750	500	330
R_0/m	16	18	20	25	30	35	40	45
超压 p/kPa	235	170	126	79	57	43	33	27
R_0/m	50	55	60	65	70	75		
超压 p/kPa	23	20.5	18	16	14.3	13		

D.1.6 多米诺事故半径

在事故后果模型范围内确定多米诺事故半径。临界阈值热辐射值 I 、临界阈值超压值 Δp ，代入公式(D.1)、公式(D.15)、公式(D.18)、公式(D.23)、公式(D.28)，确定多米诺事故半径 r_d ，初始事故中心距 n 个目标装置 $T_1、T_2、\cdots、T_n$ 距离分别为 $r_1、r_2、\cdots、r_n、r_i(i=1,2,\cdots,n) \leq r_d$ ，目标装置 T_i 受损。

D.1.7 爆炸死亡半径

给定暴露场景下，爆炸事故死亡区内的人员如缺少防护，则被认为将无例外地蒙受严重伤害或死亡，其内径为零，外径为 $R_{0.5}$ ，表示外圆周围处人员因冲击波作用导致肺出血而死亡的概率为0.5，它与爆炸量

之间的关系由式(D.29)确定：

$$R_{0.5} = 13.6 \left(\frac{W_{\text{TNT}}}{1\,000} \right)^{0.37} \dots\dots\dots (D.29)$$

式中：

W_{TNT} ——蒸气云 TNT 当量质量,单位为千克(kg)。

D.2 目标装置破坏概率

D.2.1 多米诺事故扩展判定准则

多米诺事故扩展判断准则执行公式(D.30)。

$$P_d = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{Y-5} \exp(-x^2/2) dx \dots\dots\dots (D.30)$$

式中：

P_d ——目标装置的破坏概率,[0,1]之间；

Y ——0%~100% 破坏分数对应的概率单位值。

若热辐射或超压的最低临界阈值低于最低破坏阈值,目标装置不发生破坏;若高于最低破坏阈值,目标装置发生不同程度破坏。多米诺事故物理破坏效应的阈值见表D.2。

表 D.2 物理破坏效应阈值计算表

作用形式	目标装置	破坏条件概率单位 Y	破坏阈值
超压 ^[6]	固定的常压容器和储罐	$Y = -9.36 + 1.34 \ln(\Delta p)$	5.17 kPa
	固定的带压容器和储罐、管道	$Y = -14.44 + 1.82 \ln(\Delta p)$	30 kPa
	塔型装置	$Y = -12.22 + 1.65 \ln(\Delta p)$	17 kPa
	泵和压缩机、换热器	$Y = -12.42 + 1.64 \ln(\Delta p)$	18.7 kPa
热辐射 ^[7]	固定的常压容器和储罐、管道	$Y = 12.54 - 1.847 \ln(tf)$ $\ln(tf) = -1.128 \ln(I) - 2.667 \times 10^{-5} V + 9.877$	$> 15 \text{ kW/m}^2$ $> 10 \text{ min}$
	固定的带压容器和储罐	$Y = 12.54 - 1.847 \ln(tf)$ $\ln(tf) = -0.947 \ln(I) + 8.845 V^{0.032}$	$> 40 \text{ kW/m}^2$ $> 10 \text{ min}$
注： Y ——0%~100% 破坏分数对应的概率单位值； Δp ——目标装置承受的最大峰值静态超压,单位为帕(Pa)； tf ——装置失效时间,单位为秒(s)； V ——装置体积,单位为立方米(m^3)； I ——目标装置上的热辐射强度,单位为千瓦每平方米(kW/m^2)。			

P_d 与 Y 的对应关系见表D.3。

表 D.3 P_d 与 Y 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

D.2.2 目标装置破坏概率

发生初始事故以后,邻近的目标装置 T_i 受到破坏作用破坏概率执行公式(D.31)。

$$P_s^{T_i} = P_i^0 \times P_d^{T_i} \dots\dots\dots (D.31)$$

式中:

- $P_s^{T_i}$ ——初始事故引发的目标装置破坏概率。
- P_i^0 ——选择场景的初始事故概率;
- $P_d^{T_i}$ ——目标装置 T_i 接受到热辐射强度或爆炸超压后破坏概率(P_d , [0, 1]之间);

附 录 E

(资料性)

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照 GB/T 37243—2019 附录 C, 详见表 E.1~表 E.7。

表 E.1 管道泄漏频率值

管道直径 mm	泄漏频率/($\text{m}^{-1}\text{a}^{-1}$)			
	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^{-6}	2×10^{-6}	—	2×10^{-7}
150	1×10^{-6}	1×10^{-6}	—	3×10^{-7}
200	1×10^{-6}	1×10^{-6}	3×10^{-7}	7×10^{-8}
250	7×10^{-7}	1×10^{-6}	3×10^{-7}	7×10^{-8}
300	3×10^{-7}	1×10^{-6}	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 E.2 固定的带压容器和储罐泄漏频率值

设备类型	泄漏频率/ a^{-1}			
	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 E.3 固定的常压容器和储罐泄漏频率值

设备类型	泄漏频率/ a^{-1}							
	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}

表 E.3 固定的常压容器和储罐泄漏频率值（续）

设备类型	泄漏频率/a ⁻¹							
	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
全防罐	—	—	—	1×10 ⁻⁸	—	—	—	—
半地下储罐	—	—	—	1×10 ⁻⁸	—			
地下储罐	—							

表 E.4 泵和压缩机泄漏频率值

设备类型	泄漏频率/a ⁻¹			
	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 E.5 换热器泄漏频率值

设备类型	泄漏频率/a ⁻¹			
	小孔泄漏	中孔泄漏	大孔泄漏	完全破裂
危险物质在壳程	4×10 ⁻⁵	1×10 ⁻⁴	1×10 ⁻⁵	6×10 ⁻⁶
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 ⁻⁶

表 E.6 压力泄放装置泄漏频率值

设备类型	泄漏频率/a ⁻¹
压力释放装置	2×10 ⁻⁵

表 E.7 仓库三种场景对应泄漏频率值

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1：场景1和场景2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。 注2：仓库可取以下三种场景： 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)。			

参 考 文 献

- [1] GB 36894 危险化学品生产装置和储存设施风险基准
 - [2] AQ/T 3034—2013 化工过程安全管理导则
 - [3] AQ/T 3046—2013 化工企业定量风险评价导则
 - [4] HG/T 20660—2017 压力容器化学介质毒性危害和爆炸危险程度分类标准
 - [5] Xingmin Cui, Zhang MG, Wenjie Pan. Dynamic probability analysis on accident chain of atmospheric tank farm based on Bayesian network [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2022, 158: 147-158.
 - [6] Mingguang Z, Juncheng J. An improved probit method for assessment of domino effect to chemical process equipment caused by overpressure[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 158(2-3): 280-286.
 - [7] Cozzani V, Gubinelli G, Salzano E. Escalation thresholds in the assessment of domino accidental events[J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, 129(1-3): 1-21.
-

地方标准信息服务平台