

· 经验交流 ·

风险分析在急性中毒职业病危害事故预评价中的应用

黄德寅¹, 刘茂², 王丽², 陈会祥¹, 孙金艳³

(1. 天津渤海化工集团公司劳动卫生研究所, 天津 300051; 2. 南开大学城市公共安全研究中心, 天津 300071;
3. 天津市卫生防病中心, 天津 300011)

近年我国因有毒气体泄漏造成职业中毒及突发性公共卫生事件(化学)的发生频率还很高,如重庆市开县高桥镇川东北气矿井发生的天然气“井喷”事故,重庆天原化工厂氯气爆炸泄漏事件,京沪高速公路江苏淮安段氯气泄漏事件等。事件的发生均具有突发性、灾难性、复杂性和社会性,对公众健康和国民经济的影响很大,在一定程度上也影响了社会安定与和谐。

应对灾害性突发中毒事件的策略之一就是要进行风险分析。本文阐述了职业病危害事故风险分析的目的及意义,探讨急性中毒职业病危害事故的风险分析方法,并在对某化工厂建设项目职业病危害预评价实践中,对其存在的氯气中毒事故进行了实例风险分析。

1 风险分析的涵义及一般程序

风险是某一不幸事件在一个特定的时段或环境中产生我们所不希望的后果的可能性,也即某种事故发生的概率^[1]。通常风险(F)是事故发生可能性和它们后果的函数。

即 $F=f(P, C)$

式中: P 为事件发生的概率; C 为事件发生带来的损失。

风险分析是风险管理的重要部分,风险分析主要包括 3 部分: (1) 风险辨识; (2) 概率评价与后果评价; (3) 评价风险,包括个人风险和社会风险的计算。风险管理过程及风险分析的一般程序见图 1。

2 职业病危害事故风险分析的内容及方法

2.1 风险识别

职业病危害事故风险分析需要从工程分析开始,通常运用一些定性分析的方法,系统的识别建设项目中可能产生事故的各种风险因素,并对可能导致的后果及对应的概率进行初步的认识和判定。

2.2 概率评价与后果评价

2.2.1 风险概率评价 风险概率评价是研究造成职业病危害事故发生的概率和事故的发生而引起急性中毒死亡的概率。前者如各种泄漏事故发生的概率,后者如毒气泄漏急性中毒致死的概率等。

2.2.1.1 职业病危害事故发生概率: 工业上,有毒物质在使用、生产、运输及储存中的泄漏事故概率虽然没有具体数值,但专业人士认为呈现如下规律,小型(10~100 kg)泄漏事故发生概率较大,在 10^{-2} 数量级;中型(100~2 000 kg)泄漏事

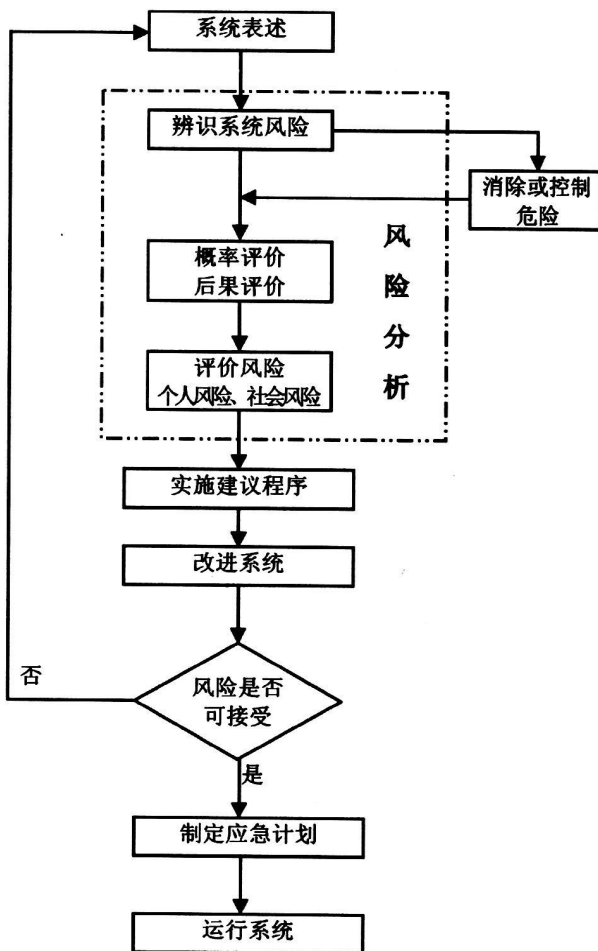


图 1 风险管理的过程

故发生概率较低,在 10^{-3} 数量级;大型(2 000~10 000 kg)泄漏事故发生概率较小,在 10^{-4} 数量级^[2]。

2.2.1.2 急性中毒死亡概率: 泄漏事故发生后,有毒物质导致人员伤害的概率符合正态分布^[2],表示为

$$P = \frac{1}{(2\pi)^{1/2}} \int_{-\infty}^{-5} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du$$

式中: P 为概率; u 为积分变量。

概率变量(Y)与人接触毒物浓度及接触时间的关系如下:

$$Y = A + B \ln(c^n t)$$

式中: Y ——符合高斯正态分布的随机变量,其均值为 5,偏差为 1; A, B, n ——取决于毒物性质的常数,对不同的毒物有不同的取值; c ——接触毒物的浓度, ppm; t ——接触毒物

收稿日期: 2006-06-08; 修回日期: 2007-05-08

作者简介: 黄德寅(1962—),女,副主任医师,研究方向为职业卫生与职业病控制。

的时间, min。

上式概率变量 Y 与中毒死亡概率 P 有直接关系, 二者可以通过查表互相换算。

2.2.2 风险后果评价 风险后果评价包括急性中毒伤害范围确定准则(即毒性评价指标)和毒性物质扩散的浓度分布两个方面。

2.2.2.1 中毒伤害范围的确定准则——毒性评价指标: 突发性灾害性有毒气体中毒事件发生后, 暴露在有毒气体浓度下中毒死亡是最关心的事故后果, 故使用扩散模型确定泄漏毒气影响区域, 对生命和健康有立即危险的浓度是最重要的毒性评价指标。根据扩散计算的浓度和范围以及暴露人数, 应用毒性指标可以计算急性中毒死亡的人数。

我国没有制定统一的毒性评价指标, 目前主要以毒理学数据对人类和动物致死的最低浓度(LC_{10})为基础划分中毒等级。当化学物质的 LC_{10} 这一项数据缺乏时, 用 LC_{50} 的十分之一作为对 LC_{10} 的估计。

国外目前广泛使用的标准即美国应急计划指南(ERPG)中采用的毒性指标^[1]。

2.2.2.2 毒物泄漏与扩散

2.2.2.2.1 泄漏源类型分析: 泄漏源的类型直接关系到扩散模型的选择, 一般的扩散模型将泄漏类型分为瞬间泄漏和连续泄漏 2 种, 二者都是实际泄漏源的理想化。1987 年 Bitter 和 McQuaid 通过实验数据的分析提出瞬间泄漏和连续泄漏判断准则^[2]: $VT_0/x \geq 2.5$ 为连续泄漏, $VT_0/x \leq 0.6$ 为瞬间泄漏; 式中 V 为环境风速 (m/s), T_0 为泄漏持续时间 (s), x 为观察者离开泄漏源的距离 (m)。

2.2.2.2.2 扩散浓度分析: 根据气云密度与空气密度的相对大小, 将气云分成重气云、中性气云和轻气云 3 类, 轻气云和中性气云统称为非重气云。

高斯模型用来描述危险物质泄漏形成的非重气云扩散行为, 或描述重气云在重力作用消失后的远场扩散行为^[2]。根据高斯模型, 泄漏源下风向某点 (x, y, z) 在 t 时刻的浓度用下面的公式计算。

瞬时泄漏时:

$$C_{x,y,z,t} = \frac{2Q}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x \sigma_y \sigma_z} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[-\frac{(x-ut)^2}{\sigma_x^2} + \frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{(z-H)^2}{\sigma_z^2} + \frac{(z+H)^2}{\sigma_z^2} \right] \right\}$$

连续泄漏时:

$$C_{x,y,z,t} = \frac{Q'}{\pi \sigma_y \sigma_z u} \exp \left\{ \frac{1}{2} \left[\frac{y^2}{\sigma_y^2} + \frac{(z-H)^2}{\sigma_z^2} + \frac{(z+H)^2}{\sigma_z^2} \right] \right\}$$

平板模型适用于分析有毒气体近地面连续泄漏形成的重气云羽在空中的扩散过程^[3]。

在平板模型的扩散过程中, 重气云羽横截面半宽随下风向距离 x 的变化由下式确定:

$$b = b_0 \left\{ 1 + \frac{1.5x}{b_0} \left[\frac{gh_0(\rho_0 - \rho_a)}{\rho_a} \right]^{1/2} \right\}^{2/3}$$

式中: b ——重气云羽的横风向半宽, m; b_0 ——泄漏源点重气云羽的横风向半宽, m; h_0 ——泄漏源点重气云羽的高度,

m; v ——重气云羽的轴向蔓延速度, m/s。

由于重气云羽横截面上危险物质通量守恒, 得重气云羽中有毒物质浓度的计算公式:

$$C = b_0 h_0 C_0 / (bh)$$

盒子模型用于分析有毒气体近地面瞬间泄漏形成的重气云团在空中的扩散过程^[2]。

在盒子模型的扩散过程中, 重气径向扩散半径与时间的关系即任意时刻重气云团的半径计算公式为:

$$r^2 = r_0^2 + 2t \left[\frac{g(\rho_0 - \rho_a)}{\rho_a} \frac{V_0}{\pi} \right]^{1/2}$$

式中: r —— t 时刻重气云团的半径, m; r_0 ——重气云团的初始半径, m; ρ_0 ——重气云团的初始密度, kg/m³; ρ_a ——空气的密度, kg/m³; V_0 ——重气云团的初始体积, m³; t ——泄漏开始后时间, s。

由于重气云团内部气体质量守恒, 因此, 在重气云团扩散过程中, 重气云团内部有毒气体浓度为:

$$C \text{ (kg/m}^3\text{)} = C_0 (x/V_0^{1/3})^{-1.5}$$

2.3 职业病危害事故风险定量分析

按照风险的主体可分为: 个人风险和社会风险。

个人风险指的是单位时期内工业危险源外围上某一点一个未采取任何保护措施的个人因危险源发生事故而导致其死亡的概率。平均个人风险等于所有引起死亡伤害的概率的和,

$$\text{即, 平均个人风险} = \sum_{i=1}^n f_i N_i / P_T$$

式中: n ——事故后果情况数; f_i ——事故后果情况 i 发生的频率; N_i ——事故后果情况 i 的伤亡数; I ——事件后果计数; P_T ——所关心的总的人口数^[3]。

社会风险指的是单位时期内工业危险源发生的所有事故中死亡人数等于 N 或大于 N 的事故发生的概率。

社会风险的计算:

$F(N) = \sum P[r_n(i)]$, 其中 $r_n(i) \geq N$; 表示对所有事故中死亡人数 $\geq N$ 的事故求概率总和^[3]。

3 实例风险分析

3.1 建设项目风险识别

位于天津地区的某新建溴素生产企业系资源性项目, 为靠近原料卤水厂址选择在天津某制盐场 2 个蒸发池之间, 北邻三段一排蒸发池和滩区内大港油田柏油路, 距离市区 30 km, 距离现有提溴厂 7 km, 厂区面积为 187 m × 112 m。该项目拟建成与现有提溴厂并存的溴素车间, 扩建后全厂拟定员 42 人, 生产操作工人 32 人, 管理人员 10 人。在制溴生产过程中需要使用液氯作为生产辅料, 用量为 2 600 t/年, 在厂区设 8 × 1 000 kg 的液氯钢瓶储存罩棚, 生产过程中液氯气化装置存在氯气泄漏的危险。

3.2 风险后果分析

3.2.1 液氯泄漏扩散范围 由于液氯的泄漏事故方式、原因及储存量等都具有不确定性, 现选择一只液氯钢瓶 10 ~ 1 000 kg 的几种泄漏量进行计算。由于液氯是高毒类物质, 溴素生

产工艺过程制定相应的安全管理措施,并设置自动控制系统,具备自动报警、紧急制动和防止误操作的功能。所以当发生泄漏事故时,完全可以在 10 min 内发现并采取相应的应急措施,所以对于液氯泄漏事故选择重气瞬间泄漏扩散模型^[4]。计算结果见表 1。

表 1 液氯泄漏扩散致死范围计算

泄漏量 (kg)	致死范围 (m)
10	179 91
20	226 78
50	308 09
100	388 52
500	666 44
1 000	841 31

注:氯气对人危险浓度为 300 mg/m³。

3.2.2 液氯泄漏风险概率的确定 急性中毒死亡概率通过计算概率变量 Y,经查表换算,见表 2。

表 2 液氯泄漏扩散风险

事件	事故概率	死亡概率	后果(死亡人数)
10 kg 液氯泄漏	10 ⁻²	2.5×10 ⁻³	4
20 kg 液氯泄漏	10 ⁻²	2.5×10 ⁻³	6
50 kg 液氯泄漏	10 ⁻²	2.5×10 ⁻³	11
100 kg 液氯泄漏	10 ⁻²	2.5×10 ⁻³	17
500 kg 液氯泄漏	10 ⁻⁵	2.5×10 ⁻³	21
1 000 kg 液氯泄漏	10 ⁻⁵	2.5×10 ⁻³	23

3.2.3 液氯泄漏风险后果的确定 事故后果是根据该建设项目的地理位置及周边环境所确定的。拟建工厂选址在天津某制盐场 2 个蒸发池之间,在事故影响范围内的只有厂区内作业人员及管理人员。作业人员 32 人,分 4 组轮流值班,则厂区内以白班时间人数计为 18 人。

事故影响范围大于 300 m 时,则还要考虑事故对厂区周围的影响。现场职业卫生调查发现,通往厂区的道路车辆主要运输原料及产品,可以假定人数为 5 人。

3.2.4 风险定量评价

3.2.4.1 个人风险:根据前面假设,建成的厂区内有 42 人,再加上通往厂区道路可能路过的人,我们将暴露在工厂带来的风险中的总人数 Pr 近似取为 47 人。

个人风险=2.3×10⁻⁵。该值接近英国(HSE)和荷兰的个人风险 10⁻⁵ 上限。

3.2.4.2 社会风险:对表 2 中的概率进行累积求和,结果见表 3。

表 3 液氯扩散社会风险

	伤亡人数			
	≥5	≥10	≥15	≥20
累计频率	8.160×10 ⁻⁵	5.610×10 ⁻⁵	3.060×10 ⁻⁵	5.100×10 ⁻⁶
荷兰标准	0.400×10 ⁻⁴	1.000×10 ⁻⁵	4.440×10 ⁻⁶	2.500×10 ⁻⁶
丹麦标准	4.000×10 ⁻⁴	1.000×10 ⁻⁴	4.440×10 ⁻⁵	2.500×10 ⁻⁵

注:荷兰和丹麦标准分别依据各自采用的社会风险最低可接受风险水平。

根据表 3 得到拟建工厂 F-N 曲线图,由此可以看出拟建工厂的社会风险大于荷兰而低于丹麦的标准。见图 2。

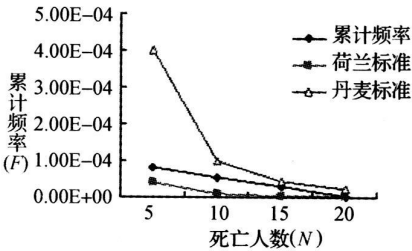


图 2 拟建溴素生产企业 F-N 曲线图

3.3 案例风险分析结论

拟建溴素生产企业有毒气体泄漏及扩散的个人风险值为 2.5×10⁻⁵,接近英国和荷兰的个人风险 10⁻⁵ 上限;社会风险也界于丹麦和荷兰的标准之间^[5]。所以该拟建工厂的风险是可以接受的。

风险分析的结果还得出,拟建工厂一旦发生液氯泄漏,10 kg 液氯泄漏蒸气云会扩散至几乎整个厂区;20 kg 液氯泄漏蒸气云会扩散至厂区运输公路线,工厂发生泄漏也会直接影响到道路运输以及人员的生命安全。

4 讨论

职业病危害风险分为职业暴露风险与事故风险 2 种。目前职业病危害预评价中通常考虑的是职业暴露引起的风险,是对建设项目正常生产可能产生的职业病危害及其对工作场所和劳动者健康的影响作出评价,其影响是相对缓慢的、长期的,后果相对确定,影响程度也相对较易度量。而职业病危害事故风险分析是对事故出现的概率及其后果进行预测及评价,主要分析职业病危害评价中不确定性的问题。因此,把风险分析作为职业病危害预评价的方法是非常必要的,可以提高职业病危害预评价的质量和技术水平。

通过风险分析推断职业病危害事故产生的后果及发生的概率,企业并按照可接受风险水平采取必要的防范与应急救援措施,可使风险降低到可接受水平,将有利于建设项目全过程风险管理,提高应急救援的能力。可见风险分析也是预防、控制和消除职业病危害,保护劳动者健康安全,促进经济发展的需要。

参考文献:

[1] 宇德明.易燃、易爆、有毒危险品储运过程定量风险评价[M].中国铁道出版社,2000:14-54.
[2] Center for Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers. Guidelines for Use of Vapor Cloud Dispersion Models[M]. American Institute of Chemical Engineers, New York, 1996.
[3] Center Chemical Process Safety of the American Institute of Chemical Engineers. Guidelines for Chemical Transportation Risk Analysis[M]. American Institute of Chemical Engineers, New York, 1995.
[4] Nishapati, Mark. Acceptability and applicability of quantified risk assessment in the next millennium. Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering-OMAE[C]. 1998, 98-1431.
[5] 丁厚成,万成略.风险评价标准值初探[J].工业安全与环保,2004,30(10):45-47.