

浅析某氯气管道安全风险评估

王炳文 (甘肃工程地质研究院, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 本文主要分析了某氯气管道在小孔连续泄漏模型下的安全风险评估, 采用社会风险和个体风险计算模型, 模拟其发生泄漏的场景下造成的风险后果。

关键词: 安全风险评估; 氯气管道; 化工安全

中图分类号: X937; TQ086 文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2025) 015-0150-03

Brief Analysis of the Safety Risk Assessment for a Chlorine Gas Pipeline

Wang Bingwen (Gansu Institute of engineering geology, Lanzhou Gansu 730000, China)

Abstract: This paper primarily analyzes the safety risk assessment of a chlorine gas pipeline under a continuous small-hole leakage model. By utilizing computational models for societal risk and individual risk, the study simulates the potential consequences of leakage scenarios to evaluate the associated hazards.

Keywords: safety risk assessment, chlorine gas pipeline, chemical safety

有毒气体的定量风险评估主要是通过一些已经形成的数学模型来计算、模拟其发生泄漏的场景下造成的风险后果, 这些模型大多是已经形成的, 在计算的过程中我们只需要认真分析对应的场景, 选取恰到的模型, 利用一些模拟软件就可以计算出其定量风险, 结果作为企业安全管理等方面的参考依据, 本项目主要选取了某氯气管道作为分析研究对象, 来模拟其风险值。

1 研究的背景项目

该氯气管道位于甘肃省某集团公司园区内, 由液氯充装站到液氯汽化器, 管道为无缝钢管 $\Phi 57 \times 5$, 材质为 Q345E, 管道除与阀门采用法兰连接外, 其余部分均采用氩弧焊。管道输送介质为液氯, 最高工作压力为 0.8MPa, 温度为 0~30℃, 管道等级为 GC1, 管内介质属于 A1 类流体。液氯管道外保温材料为铝镁质, 保温层厚度为 50mm。

2 可接受风险的标准

依据现有的标准及要求, 可接受风险的衡量可以从个人可接受风险和社会可接受风险两个层面来分析。

2.1 个人可接受风险基准

依据规定, 在生产装置和储存设施 (分为新建装置和在役装置) 周边的不同等级的防护目标的个人风险基准不同, 所承受的个人风险不应超过标准规定值, 该装置是在役装置, 在本次安全风险评估中依据规定值, 将个人风险标准划为三个等级来绘制风险等值线, 如下表 1。

2.2 社会可接受风险基准

社会可接受风险如下图所示, 其原理是将计算得出的社会风险曲线 (F-N 曲线) 与已经给定的 F-N 区

表 1 个人风险标准详细配置 (次 / 年)

风险等级	风险值	风险颜色
一级风险	3.0E-5	
二级风险	1.0E-5	
三级风险	3.0E-6	

域进行比对, 其中已经给定 F-N 区域将社会风险划分为 3 个区域, 如图 1 所示。

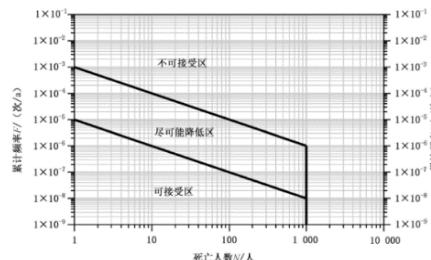


图 1 社会风险基准图

3 定量风险的计算

在本次评估中, 我们从个人风险和社会风险两个层面分析了定量风险程度。以个人风险等高线形式表现了个人风险, 以 F-N 曲线表现了社会风险。

根据该液氯管道的实际布置情况, 重点考虑人员存在数量较多的场所附近的液氯管道为例进行个人和社会风险计算 (含外部安全防护距离)。共选取了 3 个代表点进行计算, 这三个点由东至西分别是某排班房所在位置 (A1 点)、处某车间的生活间附近 (A2 点)、某车间调度室附近 (A3 点)。其中本文仅以 A1 点为例开展探讨。

3.1 个体风险计算模型

个体风险的计算其实是以人员长期处于某场所且无保护的假设为前提, 计算其由于发生事故而导致的死亡频率 (次 / 年)。

网格单元处个人风险由以下公式计算：

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

式中：

IR——网格单元处个人风险

$\Delta IR_{S,M,\phi,i}$ ——在 (LOC、M、 ϕ 、i) 条件下对网格单元个体风险的贡献

$$\Delta IR_{S,M,\phi,i} = f_s \times P_M \times P_\phi \times P_i \times P_d$$

(LOC、M、 ϕ 、i) 条件下对网格单元个体风险 (individual risk, IR) 的贡献, 按下式计算：

$$\Delta IR_{S,M,\phi,i} = f_s \times P_M \times P_\phi \times P_i \times P_d$$

式中：

f_s ——泄漏场景 (Loss of Containment; LOC) 的年失效频率；

P_M ——天气等级 M 出现的概率

P_ϕ ——该天气等级下的风向 ϕ 出现的概率

P_i ——点火事件的点火的概率

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_d , 可按下式计算：

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

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

式中 t ——暴露时间, 单位为 s。

毒性暴露下死亡概率值可按下式计算

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

式中：

$P_{\text{r毒}}$ ——毒性暴露

a, b, n——物质毒性的常数, 看查表获得

C——物质的质量浓度, 单位为 mg/m³

t——暴露时间, 单位为 min, 最大值为 30min。

3.2 社会风险计算模型

社会风险的计算结果是绘制社会风险的 F-N 曲线, N 为横坐标, 代表了死亡人数, F 为纵坐标, 表示大于或等于 N 人死亡的事故发生累计概率。所以其实在社会风险中要计算的就是, 在 N 下的 F 值：

$$F_N = \sum_{S,M,\phi,i} f_{S,M,\phi,i}$$

式中：

$f_{S,M,\phi,i}$ ——LOC 下, M, ϕ , 的联合频率

$$f_{S,M,\phi,i} = f_s \times P_M \times P_\phi \times P_i$$

式中：

f_s ——泄漏场景 (Loss of Containment; LOC) 的年失效频率；

P_M ——天气等级 M 出现的概率

P_ϕ ——该天气等级下的风向 ϕ 出现的概率

P_i ——点火事件的点火的概率

死亡总人数的计算：

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

$$\Delta N_{S,M,\phi,i} = P_{\text{社会风险}} \times N_{\text{cell}}$$

$$P_{\text{社会风险}} = P_d \times \beta_{\text{社会风险}}$$

$\beta_{\text{社会风险}}$ ——在社会风险计算时选取的人口死亡百分比修正因子。

P_d ——人员的死亡概率。

3.3 泄漏速率计算模型

本项目在考虑泄漏的时候, 主要考虑了两种泄漏场景, 一种是最常见的小孔泄漏模型, 一种是最严重的破裂的泄漏模型。

①流体经管道上的孔流出：

质量流率可按下式计算

$$Q_m = AC_0 \sqrt{2\rho(P - P_0)}$$

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 (m²) ;

C_0 ——液体泄漏系数;

P——管道内液体压力, 单位为帕斯卡 (Pa) ;

P_0 ——环境压力, 单位为帕斯卡 (Pa)

ρ ——泄漏液体密度, 单位为千克每立方米 kg/m³;

②液体管道破裂：

不可压缩流体在管道中流动, 能量是可按下式计算：

$$\frac{\Delta p}{\rho} + \frac{\Delta \mu^2}{2\alpha} + g\Delta Z + F = -\frac{W_s}{m}$$

Δp ——管道两端的压差, 单位为 Pa;

ρ ——泄漏液体密度, 单位 kg/m³;

u ——液体平均瞬时流速, 单位为米每秒 m/s;

a ——无量纲的修正系数;

g ——重力加速度, 单位为 m/s²;

F——摩擦导致的机械能损失, 单位为 m · N/kg;

W_s ——轴功, 单位为 Pa · m;

m ——质量流速, 单位为千克每秒 (kg/s) ;

Δ ——终止状态减去初始状态。

③泄漏气体的扩散模型：

在泄漏的氯气的扩散速率方面, 本使用了 Pasquill-Gifford 模型, 其的基本原理是通过大气稳定度等级 (A-F 级) 划分气象条件, 结合下风向距离计算水平与垂直扩散系数 (σ_y 和 σ_z), 进而估算污染物浓度分布。

公式如下：

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi\mu\sigma_y\sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \left\{ \exp\left(-\frac{(z-Hr)^2}{2\sigma_y^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+Hr)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right\}$$

式中：

$C(x,y,z)$ ——连续排放时, 形成稳定的流场后, (x, y, z) 点的污染物的浓度, 单位为 kg/m^3 . (其中 x 为下风向距离, y 为侧风向距离, z 为垂直风向距离, 单位均为 m);

Q ——连续排放物料的质量流量, 单位为 kg/s ;

u ——泄漏环境风速, 单位为 m/s ;

σ_y, σ_z ——侧风向和垂直风向的扩散系数, 单位为 m 。

3.4 风险评估结果

3.4.1 计算参数

3.4.1.1 气象参数

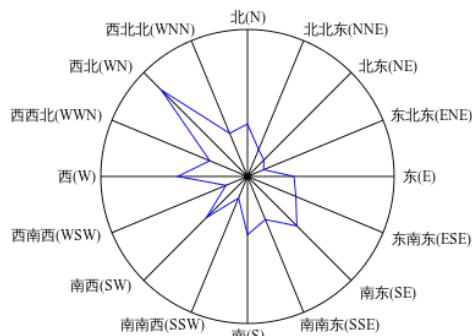


图 2 计算地的风玫瑰图

3.4.1.2 A1 点基本参数

泄漏模式: 小孔泄漏

事故类型: 有毒有害物质泄漏扩散 (LEAK)

物质相态: 液体泄漏

泄漏类型: 连续泄漏

裂口面积 (m^2) : 7.85E-5

泄漏源高度 (m) : 5

泄漏物质温度 (K) : 268

泄漏系数: 0.65

泄漏物质密度 (kg/m^3) : 1410

毒性物质性质常数 A: -6.35

毒性物质性质常数 B: 0.5

毒性物质性质常数 N: 2.75

容器压力 (Pa) : 800000

中毒浓度 (mg/m^3) : 1

液压高度 (m) : 0.0001

定压比热 ($\text{Kj}/(\text{Kg.K})$) : 0.96

常压沸点 (K) : 239

液体汽化热 (Kj/Kg) : 289

是否采用 HV 和 CP 计算: 否

3.4.2 个人风险模拟结果

个人风险的模拟结果就是将各个方向上对应的风
险等值曲线, 模拟在底图上, 清晰标识出各等级风
险, 曲线距离同其对应的安全防护距离。

表 2 各风险等级对应的外部安全防护距离 (m)

风向	外部安全防护距离		
	一级风险	二级风险	三级风险
东北东 (ENE)	358.59	438.28	527.34
北东 (NE)	289.84	363.28	443.75
北 (N)	248.44	350.78	433.59
西北 (WN)	332.03	400.78	491.41
西 (W)	340.63	416.41	472.66
西南西 (WSW)	332.81	410.16	496.88
南西 (SW)	268.75	337.5	428.13
南 (S)	290.63	375.78	447.66
南东 (SE)	331.25	397.66	488.28
东南东 (ESE)	382.81	459.38	550
东 (E)	319.53	394.53	467.19

3.4.3 社会风险

本次风险评估中, 绘制出 F-N 曲线如下, 可以看
到, 社会风险曲线进入到了尽可能降低区, 这就要求
相关企业要在能够实现的情况下, 采取措施尽可能降
低氯气管道的可能造成的风险, 例如, 对管道定期检
查维护、设置泄漏报警装置甚至搬离某些厂区内的场
所等。

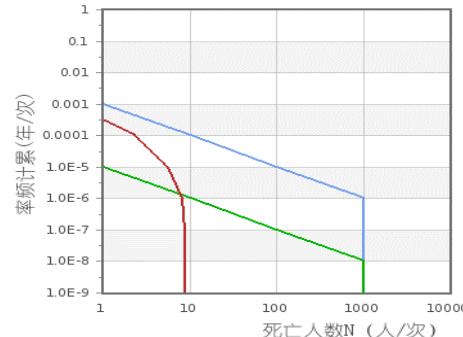


图 3 计算出的 F-N 图

4 总结

对于气态的有毒有害的危险化学品的社会风险和
个人风险的定量评估是一个复杂的过程, 在计算的过
程中需要借助专业软件进行模拟计算, 本文简要分析
了液氯管道泄漏的风险计算中的一些模型, 重点考虑
了小孔连续泄漏模型和完全破裂的情况, 绘制了社会
风险曲线, 同时提出了风险防护距离, 根据企业和周
边环境的现状, 有针对性地提出安全管理措施。通过
本次的定量风险评估, 本人认为在定量风险评估中,
计算模型的选取十分重要, 这就要求分析人员在面对
比模型更为复杂的现实情况时, 分清主要和次要矛盾,
例如选取最典型的场景、考虑最坏的结果、选取最有
代表性的参数等, 结合具体事例, 正确选取模型, 计
算结果才具有参考性。

参考文献:

- [1] GB36894-2018. 危险化学品生产装置和储存设施风
险基准 [S]. 应急管理部, 2018.
- [2] AQ/T3046-2013. 化工企业定量风险评价导则 [S]. 国
家安全生产监督管理总局, 2013.