

人工燃气爆炸与中毒事故危害定量比较分析*

崔 辉¹, 徐志胜¹, 宋文华²

(1. 中南大学 防灾科学与安全技术研究所, 湖南 长沙 410075;

2. 天津理工大学 环境科学与安全工程学院, 天津 300191)

摘 要: 分析了人工燃气在管道输送时泄漏的爆炸与中毒的危险特性, 利用概率函数形式估算了爆炸和中毒事故不同影响程度的伤害区域即致死区、重伤区、轻伤区的临界值。其中爆炸伤害区域以肺出血、耳鼓膜破裂为临界超压值依据; 中毒伤害区域则以一氧化碳毒性为依据。最后根据各级临界超压值选用蒸气云爆炸模型, 根据各级临界浓度值选用高斯模型及其发展出的特殊气象条件下的大气扩散模式进行事故后果分析, 并对人工燃气的这两种事故的结果加以定性、定量比较。

关键词: 人工燃气; 爆炸; 中毒事故; 概率函数形式; 超压; 高斯模型

中图分类号: X928.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-811X(2008)04-0096-05

0 引言

随着燃气工业的发展, 城镇燃气的种类越来越多, 主要包括天然气、人工燃气、液化石油气以及生物质气等。燃气的整体发展趋势是以天然气为主, 液化石油气潜力巨大、人工煤气逐步减少。例如, 北京已于 2006 年 7 月完成天然气置换管道人工煤气, 率先成为全国首个实现燃气管网天然气化的城市, 而上海业已确定未来城市燃气发展规划中人工煤气用户将在 2015 年基本完成改用天然气的转换。但在目前, 人工燃气在城镇燃气供应中还占有较大的比例。人工燃气组分中, 氢气、一氧化碳与空气混合易形成爆炸性气体, 遇热或明火即会发生爆炸, 另外一氧化碳在血中与血红蛋白结合会造成组织缺氧, 引发急性中毒事故^[1]。毒性灾害具有恶性突发与群发性、毒性与次生性、社会性与世界性等特点^[2,3], 可能造成大批人员的伤亡, 环境污染及生态破坏, 因此, 人工燃气的中毒事故应予以重视。城镇燃气管道多位于人口稠密区, 一旦发生爆炸和

中毒事故, 将带来巨大的人员伤亡和财产损失。本文主要针对人工燃气管道泄漏爆炸、中毒事故选取适当模型进行事故后果模拟分析, 对危险性及危险范围分别予以讨论。

1 引例事故说明

利用模型进行后果分析是一种对假想事故的可能后果描述, 并没有事故发生时间和现场的天气观测资料, 因此在进行分析时宜考虑当地最常出现的天气情况和对扩散最不利的天气情况。

选取城市中压燃气地下管道被第三方破坏, 管道被挖断后 30 min 未切断气源时, 扩散至局限空间(微风状态)和空旷空间(低风速 1.5 m/s)两种较不利情况下泄漏后的情况进行计算。已知: 管道输送压力 0.2 MP(表压), 管道裂口形状为长方形, 裂口面积 0.03 m², 焦炉煤气的绝热指数通常采用近似值 1.37^[4], 设环境温度 20 ℃, 大气稳定性为 D 级(中性稳定), 该人工燃气的组分及理化特性见表 1^[5]。

表 1 人工燃气组分及理化特性表

燃气类别	密度 /kg/m ³	燃烧热 /kJ/m ³	分子量	绝热指数	组分/体积/%								
					CH ₄	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C _m H _n	CO	H ₂	CO ₂	O ₂	N ₂
人工燃气 (焦炉煤气)	0.455	18 250	10	1.37	27	—	—	2	6	56	3	1	5

* 收稿日期: 2008-01-11

基金项目: 国家“十五”科技攻关项目(2002BA803804)

作者简介: 崔辉(1977-), 女, 河北邯郸人, 讲师, 博士研究生, 主要从事城市防灾减灾工程研究. E-mail: cuihui2000@126.com

2 利用概率函数形式估算各伤害区域临界值

可利用概率函数形式对事故后果进行伤亡百分率估算, 概率 Y 函数的一般式为^[6]:

$$Y = K_1 + K_2 \ln V, \quad (1)$$

(其中, 对于爆炸, $V = \Delta P_s$; 对于中毒, $V = C^n \cdot t$), 式中: Y 为概率值; K_1 、 K_2 为取决于不同事故类型的常数; ΔP_s 为超压值 (Pa); C 为毒物浓度 (ppm, 百万分比浓度); t 为暴露时间 (min); n 为取决于毒物性质的常数, 对于一氧化碳, $n = 1.0$ 。

表2 不同类型暴露的概率函数关系表

类型		变量		
		V	K_1	K_2
蒸气云爆炸	肺出血致死	ΔP_s	-77.1	6.91
	耳鼓膜破裂	ΔP_s	-15.6	1.93
有毒气体扩散	一氧化碳致死	$C^{10} \cdot t$	-37.98	3.7

2.1 蒸气云爆炸伤害分区

人工燃气爆炸产生的冲击波直接作用于人体, 其中肺是最易遭受到直接伤害的致命器官, 耳是最易遭受直接伤害的非致命器官, 所以确定致死、重伤、轻伤区域以肺出血、耳鼓膜破裂为依据。

致死区 人员如缺少防护, 则将无例外地蒙受严重伤害或死亡, 人员因爆炸冲击波作用导致肺出血而死亡的概率为 50%, 由概率与伤亡百分率的换算表查出相应的概率 Y 值为 5, 可计算出相应的 ΔP_s 值:

$$Y = K_1 + K_2 \ln \Delta P_s = -77.1 + 6.91 \ln \Delta P_s = 5, \\ \Delta P_s = 147\,059 \text{ Pa}.$$

重伤区 人员如缺少防护, 则绝大多数人员将遭受严重伤害, 极少数人可能死亡或受轻伤, 人员因爆炸冲击波作用导致耳鼓膜破裂而严重受伤的概率为 50%, 由概率与伤亡百分率的换算表查出相应的概率 Y 值为 5, 可计算出相应的 ΔP_s 值:

$$Y = K_1 + K_2 \ln \Delta P_s = -15.6 + 1.93 \ln \Delta P_s = 5, \\ \Delta P_s = 43\,199 \text{ Pa}.$$

轻伤区 人员如缺少保护, 绝大多数人员将遭受轻微伤害, 少数人将受重伤或平安无事, 死亡的可能性极小, 人员因爆炸冲击波作用导致耳鼓膜破裂而严重受伤的概率为 1%, 由概率与伤亡百分率的换算表查出相应的概率 Y 值为 2.67, 可计算出相应的 ΔP_s 值:

$$Y = K_1 + K_2 \ln \Delta P_s = -15.6 + 1.93 \ln \Delta P_s = 2.67, \quad \Delta P_s = 12\,917 \text{ Pa}.$$

2.2 一氧化碳气体中毒伤害分区

人工燃气中一氧化碳是引发中毒事故的主要原因, 选取一氧化碳划分泄漏扩散中毒伤害区域。

致死区: 本区人员如缺少防护或未能及时逃离, 则将无例外地蒙受严重中毒, 人员因中毒作用死亡的概率为 50%。历次毒物泄漏事故证明, 造成严重伤害的人群接触高浓度的时间一般不超过 30 min, 因为在这段时间里人员可以逃离现场或采取保护措施^[7]。因此假定“致死区”最长接触时间为 30 min, 由概率与伤亡百分率的换算表查出相应的概率 Y 值为 5, 可计算出相应的浓度值:

$$Y = K_1 + K_2 \ln C^{10} \cdot t = -37.98 + 3.7 \ln C^{10} \cdot 30 = 5, \quad C_1 = 3\,696 \text{ ppm}.$$

除了以上计算所得的 50% 人员死亡的致死浓度外, 还有一个重要的毒性参数——半数致死浓度 (LC₅₀) 或半数致死剂量 (LD₅₀), 用于表示急性毒性的毒性的参数。LD₅₀ 或 LC₅₀ 是一个经过统计学处理计算得到的数值, 是指化学毒物能引起受试动物的在一定时间内半数致死 (50%) 死亡所需的剂量或浓度。在部分文献^[7-9]中表述在实际应用中为简化分析, 利用该数据划分致死区。徐志胜等^[10,11]在液氯案例研究中通过比较死亡百分率为 50% 时浓度与半数致死浓度 LC₅₀, 确定有毒气体的致死区浓度。

已知一氧化碳的半数致死浓度 2 069 mg/m³ (大鼠吸入, 4 h), 在标准状态下, ppm 与 mg/m³ 做如下换算^[12]:

$$C'_1 = \frac{2\,069 \times 22.4}{28} = 1\,655.2 \text{ ppm}. \quad (2)$$

$Y = K_1 + K_2 \ln C^{10} \cdot t = -37.98 + 3.7 \ln 1\,655.2^{10} \cdot 30 = 2.03$, 查概率与死亡百分率的换算表, 死亡百分率约为 1%, 远小于 50%, 一氧化碳的半数致死浓度不适合作为划分致死区浓度依据, 与文献^[10]结论相同。

重伤区 本区内大部分人员蒙受重度或中度中毒, 须住院治疗, 有个别人甚至中毒死亡, 取人员死亡概率为 5%, “重伤区”最长接触时间也假定为 30 min, 由概率与伤亡百分率的换算表查出相应的概率 Y 值为 3.36, 可计算出相应的浓度值:

$$Y = K_1 + K_2 \ln C^{10} \cdot t = -37.98 + 3.7 \ln C^{10} \cdot 30 = 3.36, \quad C_2 = 2\,373 \text{ ppm}.$$

轻伤区 本区内大部分人员有轻度中毒或吸入反应症状, 门诊治疗即可康复, 取人员死亡概

率为 1%， “轻伤区” 由于覆盖面积大， 疏散困难， 最长接触时间假定为 60 min^[7]， 由概率与伤亡百分率的换算表查出相应的概率 Y 值为 2.67， 可计算出相应的浓度值：

$$Y = K_1 + K_2 \ln C^{10} \cdot t = -37.98 + 3.7 \ln C^{10} \cdot 60 = 2.67, C_3 = 985 \text{ ppm}。$$

3 管道泄漏速度估算

利用伯努利方程和绝热方程可得泄漏速度估算公式^[13,14]：

$$Q = Y C_d A P \sqrt{\frac{Mk}{RT} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}}。 \quad (3)$$

其特征可以用临界或亚临界流来描述。临界流(其最大出口速度等于声速)发生与否依赖于储存压力与大气压力之比。

当 $\frac{P_0}{P} \leq \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}$ 时， 气体流动属音速流动， $Y = 1.0$ ；

当 $\frac{P_0}{P} > \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}$ 时， 气体流动属亚音速流动，

$$Y = \left[\frac{P_0}{P} \right]^{\frac{1}{k}} \times \left\{ 1 - \left[\frac{P_0}{P} \right]^{\frac{(k-1)}{k}} \right\}^{\frac{1}{2}} \times \left\{ \left[\frac{2}{k-1} \right] \times \left[\frac{k+1}{2} \right]^{\frac{(k+1)}{(k-1)}} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

式中： Q 为气体泄漏速度(kg/s)； Y 为流出系数； C_d 为气体泄漏系数，当裂口形状位圆形时取 1.00，三角形时取 0.95，长方形时取 0.90； A 为裂口面积(m²)； P 为气体压强(Pa)； M 表示气体摩尔质量(kg/mol)； k 为气体的绝热指数，即定压比热 C_p 与定容比热 C_v 之比； R 为气体常数，取 8.314 510 J/mol · K； T 为环境温度(K)； P_0 为大气环境压力(Pa)； P 为管道内介质压力(Pa)。

该小孔模型可得出气体释放的最初排放速度，源外泄速度小或者周期短，则在计算中采用最初排放速度是可行的。

计算判定气体泄漏属于音速流动，根据公式(3)， $Y=1.0$ ，人工燃气泄漏速度 Q 估算为 7.371 kg/s，则一氧化碳的泄漏速度估算为 0.442 kg/s。

4 蒸气云爆炸定量分析

扩散至局限空间时，爆炸事故选用蒸气云爆炸(VCE, vapor cloud explosion)模型，可燃气体的爆炸能量为：

$$E = \eta Q t H_c, \quad (5)$$

式中： η 为蒸汽云爆炸的效率因子，取 0.01 ~ 0.1，甲烷、氢均取 0.03； H_c 为气云燃烧热(kJ/kg)。

对于地面爆炸，由于地面反射作用使爆炸威力几乎加倍，一般应乘以地面爆炸系数 1.8。故

$$E = 1.8 \eta Q t H_c。 \quad (6)$$

焦炉煤气的爆炸能量 E 估算为：

$$28\ 179\ 777.6 \text{ kJ}。$$

理想气体点源爆炸冲击波超压 ΔP_s 随 R/R_0 的衰减规律可拟合成下列公式^[15]：

当 $\Delta P_s > 0.5 \text{ MPa}$ 时，

$$\Delta P_s = \left[1 + 0.1567 \left(\frac{R}{R_0} \right)^{-3} \right] \times 0.1013。 \quad (7)$$

当 $0.01 \text{ MPa} < \Delta P_s < 1.0 \text{ MPa}$ 时，

$$\Delta P_s = \left[0.137 \left(\frac{R}{R_0} \right)^{-3} + 0.119 \left(\frac{R}{R_0} \right)^{-2} + \right.$$

$$\left. 0.269 \left(\frac{R}{R_0} \right)^{-1} - 0.019 \right] \times 0.1013。 \quad (8)$$

$$R_0 = \left(\frac{E}{P_0} \right)^{1/3}, \quad (9)$$

式中： R 为目标至蒸汽云中心距离(m)； P_0 为大气压(Pa)。

根据致死、重伤、轻伤区的临界超压值利用公式(8)、(9)，即可计算出不同的伤害区域影响距离分别为 39、73、170 m。

5 泄漏扩散定量分析

在计算人工燃气泄漏时一氧化碳中毒事故的扩散影响范围时，我国应用实践中扩散参数的计算可参见国家环保局批准的《环境影响评价技术导则 大气环境》^[16]。

(1) 有风条件($v = 1.5 \text{ m/s}$)下，选用高斯连续点源扩散模型^[13]：

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \times \left\{ \exp\left[-\frac{(z - H_e)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z + H_e)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\}, \quad (10)$$

式中： $C(x, y, z)$ 表示空间某点(x, y, z)有毒物质浓度(mg/m³)； Q 为连续排放的物料流量(mg/s)； u 为风速(m/s)； σ_y 、 σ_z 为 y 、 z 方向的扩散系数(m)； y 为横风向距离(m)； z 为离地面的距离(m)； H_e 为有效源高(m)。

令 $z = 0$ ，可得地面轴线浓度公式：

$$C(x, 0, 0) = \frac{Q}{2\pi u \sigma_y \sigma_z}。 \quad (11)$$

根据致死、重伤、轻伤区的临界浓度值利用公式(11)即可计算出不同的伤害区域影响距离 30、39、62 m。

(2)微风条件属于特殊的气象条件,在此状态下,气体的扩散具有一定的特殊性,选用特殊条件下的大气扩散模型^[17]:

$$C(x, 0, 0) = \frac{2Q}{(2\pi)^{3/2} V^* x \sigma_z}, \quad (12)$$

式中: V^* 为微风条件下的水平散布速率,一般取 0.7。

根据致死、重伤、轻伤区的临界浓度值利用

公式(12)即可计算出不同的伤害区域影响距离 14、18、28 m。

6 结论

利用概率函数形式估算了爆炸和中毒事故不同影响程度区域即致死区、重伤区、轻伤区的临界值,根据各级临界超压、浓度值参照蒸气云爆炸模型和高斯扩散模型进行事故后果模拟估算伤害区域,两种事故的影响距离结果汇总如表 3。

表 3 两种事故模型伤害区域结果比较

事故 模型	蒸气云爆炸		中毒			
	临界超压值	影响距离	临界浓度值	临界浓度值	微风状态	有风状态
	$\Delta P_s/\text{Pa}$	R/m	C/ppm	$C/\text{mg}/\text{m}^3$	影响距离 R/m	影响距离 R/m
致死区	147 059	39	3 696	4 620	14	30
重伤区	43 199	73	2 373	2 966	18	39
轻伤区	12 917	170	985	1 231	28	62

当人工燃气泄漏至局限空间时,易形成处于爆炸极限之内的混和物,遇足够强的火源的引燃能量,则可能发生蒸气云爆炸,产生较强的冲击波危害,蒸气云爆炸中蒸气云团可分为三个区域:泄漏源周围的富集区、云团边缘的贫集区、介于二者之间的云团处于爆炸极限范围内,这部分蒸气云所占比例取决于多个因素。案例模拟计算是选取所有的泄漏量,因而结果偏大,较保守。同时也应考虑到一氧化碳的危害性,且局限空间可能处于静风或微风状态,不存在有毒气体在某一主导方向扩散稀释的现象,一氧化碳集聚易导致中毒事故。当人工燃气泄漏至空旷空间时扩散,则主要考虑一氧化碳中毒事故的发生,由于主导风向的作用,其下风向影响范围有所扩大。依据临界浓度值划分区域,并在不同的区域采取相应的措施,即在什么浓度范围内人员必须立即疏散并采取防护措施,考虑被救人员急性中毒危害的恢复和施救人员的防护工作,什么浓度范围内人员只需要采取就地防护措施即可,以期最大限度的即时有效的减轻有毒气体对人员的伤害。

参考文献:

- [1] 周国泰. 危险化学品安全技术全书[M]. 北京: 化学工业出版社, 1999: 1481.
- [2] 史志诚. 20 世纪全球重大毒性灾害及其历史教训[J]. 灾害学, 2002, 17(1): 77-78.
- [3] 史志诚. 当代世界 50 起重大毒性灾害初析[J]. 灾害学, 1995, 10(2): 73.
- [4] 方象簿, 何玉秀. 较精确的焦炉煤气绝热指数[J]. 国外炼焦化学, 1990, (3): 60.
- [5] 马良涛. 燃气输配[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 3.
- [6] 刘茂. 事故风险分析理论与方法[R]. 天津: 南开大学公共安全研究中心, 2006: 102.
- [7] 左哲. 危险化学品泄漏事故应急救援辅助决策支持系统[D]. 沈阳: 沈阳航空工业学院, 2005.
- [8] 王樟龄, 付贵生, 夏龙君. 有毒气体泄漏扩散伤害分区的研究[J]. 职业卫生与应急救援, 1996, 14(3): 3-5.
- [9] 胡二邦. 环境风险评价[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2000: 246.
- [10] Xu Zhisheng, Cui Hui, Song Wenhua. Quantitative Poisoning Risk Analysis on Chlorine Leakage from Liquid Chlorine-containing Steel Cylinder [C] //Huang Ping. Process in Safety Science and Technology (vol. IV) Part B. Beijing: Science Press, 2006. 1319-1323.
- [11] 崔辉, 徐志胜, 宋文华, 等. 有毒气体危害区域划分之临界浓度标准研究. 灾害学, 2008, 23(3): 80-84.
- [12] 鲁传宏, 赵望新, 陈卫团, 等. ppm 与 mg/m^3 换算关系探讨[J]. 中国卫生检验杂志, 2003, 13(1): 111.
- [13] 李民权, 曹德杨, 欧阳福康, 等译. 工业污染事故评价技术手册[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1992: 156.
- [14] 田贯三. 管道燃气泄漏过程动态模拟的研究[J]. 山东建筑工程学院学报, 1999, (4): 56.
- [15] 赵衡阳. 气体和粉尘爆炸原理[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1996: 286.
- [16] HJ/T2. 2-1993, 环境影响评价技术导则大气环境[S].
- [17] 宋新山, 邓伟. 环境数学模型[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 167.

Quantitative Comparative Analysis on Explosion and Poisoning Accidents of Artificial Gas

Cui Hui¹, Xu Zhisheng¹ and Song Wenhua²

(1. *Institute of Disaster Prevention Science and Safety Technology, Central South University, Changsha 410075, China*; 2. *Department of Environmental Science and Safety Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300191, China*)

Abstract: The explosion and poisoning risk of artificial gas leakage in pipeline transportation is analyzed and the critical radiuses of different risk zones such as the lethal zone, severe harm zone and slight harm zone caused explosion and poisoning accidents are estimated by probability function model. Among them, the critical overpressure criteria of explosion harm zone are pulmonary hemorrhage, eardrum rupture and criterion of poisoning harm zone is toxicity of carbon monoxide. Finally, according to the critical overpressure values and concentration values, vapor cloud explosion model, Gaussian model and atmospheric dispersion model of the special weather conditions, accident consequence is analyzed and the qualitative and quantitative comparisons on consequences of these two kinds of accidents of artificial gas are made.

Key words: artificial gas; explosion; poisoning; probability function model; overpressure; Gaussian model

(上接第 65 页)

Conceptual Model of Disaster Shelter Planning Based on the Vitae System

Xu Wei^{1, 2}, Okada Norio³, Xu Xiaoli⁴ and Shi Peijun^{1, 2, 5}

(1. *Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Ministry of Education of China, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*; 2. *Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Ministry of Civil Affairs & Ministry of Education, Beijing 100875, China*; 3. *Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Uji 6110011, Japan*; 4. *China Land Surveying and Planning Institute, Ministry of Land and Resources, Beijing 100035, China*; 5. *State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*)

Abstract: In this paper, the concepts and types of disaster shelters are reviewed and systematically examined and different spatial scales of shelter planning are summarized by comparing some existing shelter planning practices in China, Japan and USA. Then 3 types of disaster shelter planning and 8 implementing standards are proposed in the terms of the Vitae System. Based on it, 3 basic models for disaster shelter planning and evaluation are established.

Key words: disaster shelter; planning; the Vitae System; conceptual model