

doi:10.3969/j.issn.1671-5152.2011.06.004

# 城市燃气输配管网事故后果评估方法研究

□ 北京市劳动保护科学研究所 (100054) 张晓峰 吕良海 白永强 白光 马云飞

**摘 要:** 本文简单概括了城市燃气输配管网事故可能造成的后果损失类型,包括人员伤亡、财产损失和对用户的影响;针对每种损失类型,分别建立了相关的损失计算方法;建立了事故损失折算模型,将各类型的损失折算为影响用户的数量。此外,提出了以影响用户的数量为指标的城市燃气输配管网后果严重程度等级划分标准。综合提出了一套城市燃气输配管网后果评估的新思路。

**关键词:** 城市燃气输配管网 后果损失 影响用户数量 损失折算模型

## 1 引言

城市燃气输配管网是现代城市生命线系统的重要组成部分之一,是将城市燃气输送到千家万户的最为主要的工具。随着科技的发展,管网建设、维护及在线监测技术不断发展,但由于其深埋地下,同时受到诸如腐蚀、施工破坏、管网本身的设计施工的缺陷,及管网周边环境变化等因素,管网事故时有发生。同时,由于城市燃气输配管网往往位于人口密度大、市政设施集中的区域,一旦发生事故,往往造成大量人员伤亡、财产损失及环境污染等后果。为了降低管网风险,减少发生事故的损失,到目前为止,许多专家学者已经进行了大量的关于管网风险评估的研究工作,如故障树法、肯特法、贝叶斯法等<sup>[1]</sup>。但是多数方法在事故后果评价的过程中,往往只针对事故可能造成的人员伤亡进行评价。虽然财产损失,影响用户的数量等问题相对人员伤亡的影响较小,但是随着城市不断发展所产生的要求,财产损失及对用户的影响等后果越来越不可忽视。

## 2 城市燃气输配管网事故后果评估方法

根据上文中提到的事故损失类型,可知城市燃气

输配管网事故后果可以用式1表示。

$$L=L_d+L_h+L_g+L_n \quad (1)$$

式中, $L$ —事故总损失; $L_d$ —死亡人数; $L_h$ —受伤人数; $L_g$ —财产损失; $L_n$ —受到影响用户的数量。

### 2.1 事故造成人员死亡的评估方法

城市燃气输配管网发生火灾爆炸的形式主要有以下几种:喷射火(Jet fire)、火球(Fire ball)和蒸气云爆炸(UCVE)<sup>[2]</sup>。

#### 2.1.1 蒸气云爆炸的破坏作用

根据文献资料可知对于质量为 $m$ 的爆炸源,在地面发生爆炸,其爆炸超压可以由式2计算得到。

$$\Delta P=1.1\left[\frac{\sqrt[3]{m}}{\gamma}\right]+4.6\left[\frac{\sqrt[3]{m}}{\gamma}\right]^2+15.4\left[\frac{\sqrt[3]{m}}{\gamma}\right]^3 \quad (2)$$

式中, $\Delta P$ —爆炸超压,Pa; $\gamma$ —爆炸影响区域内某点至爆源的距离,m; $m$ —泄漏的质量,kg。

将表1、表2中的阈值代入式2,即可得到破坏半径。

#### 2.1.2 热辐射的破坏作用

##### (1) 火球的热辐射

距离火球中心某处的目标接受到的热辐射剂量可由式3计算得到。

表1 爆炸对人体的伤害

| 人体可承受的<br>阈值(MPa) | 相应的<br>伤亡情况         | 相应的<br>伤害半径(m)      |
|-------------------|---------------------|---------------------|
| 1.0               | 大部分人员死亡<br>70%-100% | $R_1=0.942\sqrt{m}$ |
| 0.75              | 内脏严重损伤<br>或死亡(10%)  | $R_2=1.051\sqrt{m}$ |
| 0.40              | 听觉器官损伤<br>或骨折       | $R_3=1.461\sqrt{m}$ |
| 0.25              | 轻微损伤                | $R_4=1.829\sqrt{m}$ |

表2 爆炸对建筑物的伤害

| 建筑物可承受的<br>阈值(MPa) | 建筑物相应的<br>破坏情况      | 相应的<br>伤害半径(m)      |
|--------------------|---------------------|---------------------|
| 2.5                | 大型钢结构破坏             | $R_1=0.608\sqrt{m}$ |
| 1.5                | 防震钢筋混凝土<br>破坏,小房屋倒塌 | $R_2=0.777\sqrt{m}$ |
| 0.25               | 墙裂缝                 | $R_3=1.829\sqrt{m}$ |
| 0.06               | 门窗玻璃部分破碎            | $R_4=3.028\sqrt{m}$ |

$$q = \frac{QT}{4\pi R^2} \quad (3)$$

式中, T—热传导系数, 保守取值1.0; Q—火球的总辐射量, J。可以用泄漏燃气质量的90%作为参与燃烧的部分燃烧所释放的热量表示, 其中:

$$Q = m_f H_f = 0.9m H_c \quad (4)$$

式中,  $H_c$ —可以用甲烷的燃烧热表示,

$$H_c = 5.56 \times 10^7 \text{ J/kg}$$

由式3、4可得到火球热辐射的影响半径为式5

$$R = \sqrt{\frac{0.9mH_cT}{4\pi q}} \quad (5)$$

将表3中不同的热剂量阈值代入式5, 可计算得到火球热辐射造成的伤害半径。

表3 火球热辐射强度所造成的人员伤害半径

| 热剂量阈值 (kJ/m <sup>2</sup> ) | 对人体的伤害 | 相应伤害半径 (m)         |
|----------------------------|--------|--------------------|
| 375                        | 人员死亡   | $R_1=3.43\sqrt{m}$ |
| 250                        | 人员重伤   | $R_2=4.21\sqrt{m}$ |
| 125                        | 人员轻伤   | $R_3=5.95\sqrt{m}$ |
| 65                         | 皮肤疼痛   | $R_4=8.25\sqrt{m}$ |

(2) 喷射火的热辐射

喷射火的热辐射通量为式6。

$$Q_{Jet} = \eta H_c Q \quad (6)$$

式中,  $Q_{Jet}$ —燃气喷射稳态燃烧时释放的辐射热通量, W;  $\eta$ —效率因子, 取0.35; Q—燃气的泄漏流量, kg/s。

喷射火稳态燃烧区外某一点受到的热辐射强度为式7:

$$I = \frac{Q_{Jet} T_{Jet}}{4\pi R^2} \quad (7)$$

式中, I—距离燃烧中心为R的热辐射强度, W/m<sup>2</sup>;  $T_{Jet}$ —辐射率系数, 取0.2。

将式6代入式7, 可得:

$$I = \frac{\eta H_c Q T_{Jet}}{4\pi R^2} \quad (8)$$

$$R = \sqrt{\frac{\eta H_c Q T_{Jet}}{4\pi I}} \quad (9)$$

将表4中不同的热损伤阈值代入式9中, 可以得到相应的伤害半径。

表4 燃气稳态燃烧对人体的伤害

| 热阈值 (kW/m <sup>2</sup> ) | 对人体的伤害    | 相应伤害半径 (m)           |
|--------------------------|-----------|----------------------|
| 37.5                     | 1%死亡/10s  | $R_1=2.847\sqrt{Q}$  |
| 25.0                     | 重大损伤/10s  | $R_2=3.520\sqrt{Q}$  |
| 12.5                     | 1度烧伤/10s  | $R_3=4.978\sqrt{Q}$  |
| 4.0                      | 20s以上感觉疼痛 | $R_4=8.799\sqrt{Q}$  |
| 1.6                      | 长期辐射无不舒服感 | $R_5=13.913\sqrt{Q}$ |

## 2.2 影响用户数量

城市燃气输配管网是一种网络结构, 一般包括两种基本形式: 环状管网和枝状管网。在城市中心区域以及主要的燃气供气区域内, 主干管一般都布置成环状管网, 以降低因主干管网发生故障后影响大面积用户的概率。而在一些小街道内、或街道两侧均是分散用户以及郊区, 燃气管网则以枝状管网为主要分布形式。每个管网节点有2至3个分支, 每个管段有0至2个控制管线联通的阀门。管网任意两个节点之间可由许多条“路径”相互连通。

在对某管段进行风险分析过程中, 计算管段发生

事故后影响用户的数量主要有3个步骤,包括关阀方案的确定、确定受到关阀影响的调压器和确定影响用户资料。

### 2.2.1 关阀方案的确定

管网发生泄漏事故后,首先找出事故点所对应的管段。如果该管段两端都是阀门,则分析可以结束;如果只有其中一端是阀门,则从没有阀门的一端出发查找阀门,直到围绕事故点形成一个最小的封闭区域;若管段两端都没有阀门,则分别从管段两端出发查找阀门,直到围绕事故点形成一个最小的封闭区域,将初步确定需要关闭的阀门建立阀门集。如图1所示,当事故发生在事故点1时,首先看到该管段两端分别是阀门F<sub>4</sub>和F<sub>7</sub>,分析结束;当事故发生在事故点2时,管段右侧是阀门F<sub>2</sub>,而左边是三通管件,因此,从事故点右侧开始查找,直到阀门F<sub>2</sub>,F<sub>3</sub>,F<sub>4</sub>围成一个封闭区域,分析结束;当事故发生在事故点3时,该管段两端均不是阀门,因此,分别从该点两端开始查找,查找到阀门F<sub>1</sub>,F<sub>2</sub>,F<sub>5</sub>,F<sub>6</sub>,F<sub>7</sub>围成一个封闭区域,分析结束。

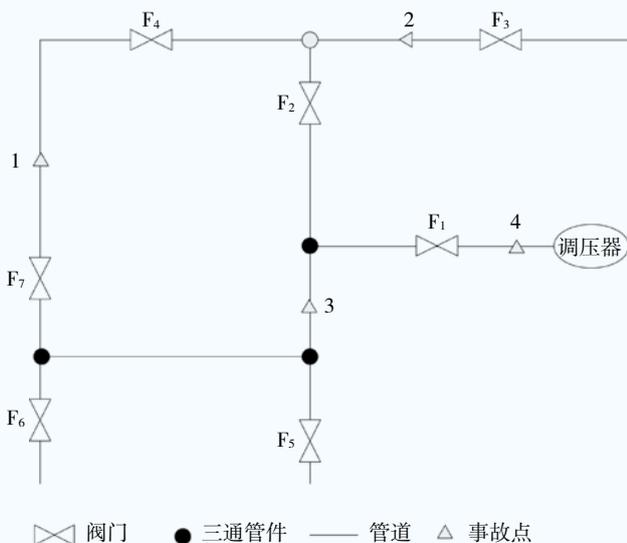


图1 关阀模型示意图

以阀门集中的每个阀门为起点,查找气源,如果遇到阀门集中的阀门,则停止在该路径上查找;如果通过某路径能够查找到气源,则该阀门必须关闭;如果所有路径均不能查找到气源,则应将该阀门从阀门集中去除。

### 2.2.2 查找受到关阀影响的调压器

以初步选定关阀方案阀门集中不需要关闭的阀门为起点开始查找调压器,如果遇到阀门集中的阀门,则停止在该路径上的查找;如果通过某路径能够查找到调压器,则应关闭该调压器。

### 2.2.3 确定影响用户资料

根据查找到的调压器,对照用户档案,确定该调压器对应的用户数量。

## 2.3 城市燃气输配管网事故损失折算方法

由于城市燃气输配管网事故引起的各类损失有不同的计量方式,因此,给管网风险预测带来了一些不便。因此,有必要对各类损失进行折算,建立统一的衡量标准。目前,常用的事故损失折算模型主要将伤亡人员按照当时社会医疗费用、丧葬及抚恤费用、补助及急救费用和受伤人员歇工损失的工效费用折合为损失的货币;将受到破坏的固定资产、环境污染分别按照规定固定资产维修、报废、环境污染处理费用折合为货币。鉴于城市燃气输配管网在发生泄漏后火灾爆炸是小概率事件,而事故大多是对居民的正常用气产生一定的影响,同时,由于目前我国还没有统一的燃气突发事件等级划分标准,因此,本文借鉴某市城市燃气突发事件应急预案中关于燃气突发事件等级划分的标准,将燃气事故造成的各类损失折合为影响用户的数量,从而用统一的标准来衡量燃气事故后果的严重程度。

由某市城市燃气突发事件应急预案事故分级标准(见表5)可以得到事故等效折算的方法如式10、11和12。

(1) 得到死亡人数的折算方法如式10:

$$L_d = \begin{cases} 1000L_d & L_d \geq 10 \\ \frac{1000(9L_d - 20)}{7} & 3 \leq L_d < 10 \\ \frac{1000L_d}{3} & 0 \leq L_d < 3 \end{cases} \quad (10)$$

式中, $L_d$ —死亡人数折算为影响用户数量(户)的结果。

(2) 受伤人数的折算方法如式11:

$$L_h = \begin{cases} 300L_h & L_h \geq 100 \\ 400L_h - 10000 & 50 \leq L_h < 100 \\ 225L_h - 1250 & 10 \leq L_h < 50 \\ 100L_h & 0 \leq L_h < 10 \end{cases} \quad (11)$$

表5 城市燃气输配管网事故分级标准

| 级别             | 描述   |
|----------------|--|
| 特别重大事件<br>(I级) | (1) 高压B (2.5 MPa ≥ P ≥ 1.6 MPa) 以上级别的供气管网发生燃气火灾、爆炸或发生燃气泄漏事故, 或导致30人以上死亡, 或100人以上重伤, 或造成1亿元以上直接经济损失, 严重影响燃气供应和危及公共安全;<br>(2) 供气管网发生突发事件, 造成3万户以上居民连续停止供气24h (或以上);  |
| 重大事件<br>(II级)  | (1) 次高压以上级别的天然气供应管网失效发生火灾、爆炸或发生燃气泄漏, 或导致10人以上30人以下死亡, 或者50人以上100人以下重伤, 或造成5 000万元以上1亿元以下直接经济损失, 严重影响局部地区燃气供应和危及公共安全;<br>(2) 失效造成1万户以上, 3万户以下居民连续停止供气24h以上; 高等院校的公共食堂连续停气24h以上;<br>(3) 失效发生在重要会议代表驻地、使馆区等敏感部位, 可能造成重大国际影响。              |
| 较大事件<br>(III级) | (1) 失效引起火灾、爆炸, 导致3人以上10人以下死亡, 或者10人以上50人以下重伤, 或造成直接经济损失1 000万元以上5 000万元以下, 影响到局部地区燃气供应和危及公共安全, 且燃气供应单位通过启动本单位应急预案能够及时处置的。<br>(2) 失效发生在大型公共建筑或人群聚集区, 如广场、车站、城市主干道、医院、机场、大型商场超市、重要活动现场、重要会议代表驻地及本市重点防火单位和地区等发生燃气泄漏、火灾、爆炸, 造成人员伤亡或引起交通中断。 |
| 一般事件<br>(IV级)  | 失效导致3人以下死亡, 或者10人以下重伤, 或者造成1 000万元以下直接经济损失, 影响区域燃气供应和危及公共安全或停气影响1 000户以下居民, 且24h内无法恢复, 或影响1 000户以下居民采暖2h以上。  |

式中,  $L_h$ —受伤人数折算为影响用户数量 (户) 的结果。

(3) 财产损失的折算方法如式12:

$$L_g = \begin{cases} 3L_g & L_g \geq 10\ 000 \\ 4L_g - 10\ 000 & 5\ 000 \leq L_g < 10\ 000 \\ 2.25L_g - 1\ 250 & 1\ 000 \leq L_g < 5\ 000 \\ L_g & 0 \leq L_g < 1\ 000 \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $L_g$ —财产损失 (万) 折算为影响用户数量 (户) 的结果。

综合上述结论, 可得城市燃气输配管网事故损失结果可由式13计算得到:

$$L = L_d + L_h + L_g + L_n \quad (13)$$

#### 2.4 事故后果严重程度等级划分标准

结合表5, 本研究中将事故后果严重程度等级划

分为5个级别, 如表6所示。

### 3 结语

本文讨论了城市燃气输配管网事故后果评价方法。为了更加全面的反映和度量风险评估过程中城市燃气输配管网事故后果严重程度, 综合考虑了事故可能造成的人员伤亡、财产损失和影响用户数量三种损失类型, 并按照相关规范要求, 建立了各类型损失折算到影响用户的数量的折算方法。同时提出了以影响用户的数量为指标的事故后果严重程度等级划分标准。总之, 本文的研究为城市燃气输配管网风险评估中事故后果的评估提供了新的思路, 有一定的研究意义。

表6 城市燃气输配管网后果损失等级划分标准

| 等级  | 等级描述                        |
|-----|-----------------------------|
| V   | 影响用户数量小于1 000户              |
| IV  | 影响用户数量大于等于1 000户且小于10 000户  |
| III | 影响用户数量大于等于10 000户小于30 000户  |
| II  | 影响用户数量大于等于30 000户小于100 000户 |
| I   | 影响用户数量大于等于300 000户          |

#### 参考文献

- 1 刘斐.城市燃气管道定量风险分析技术的研究[D].南开大学博士学位论文.2007; 5
- 2 李美庆.安全评价员实用手册[M].北京: 化学工业中国石化出版社, 2007