

关于城市天然气管网火灾定量风险分析系统研究与实现

何杭程 (杭州市桐庐县消防救援大队, 浙江 杭州 310000)

摘要: 我国城市天然气管道建设已进入大规模建设阶段, 但其运行过程中存在着严重的安全隐患。由此引发的天然气泄漏、火灾、爆炸等事故, 给人民群众的生命财产带来了极大的危害。本项目以此为基础, 以城市燃气管网为研究对象, 在考虑燃气泄漏引起的建筑火灾等特点的基础上, 构建适合我国实际情况的城市天然气管网火灾传播模型, 同时利用 C# 编程和 Arc GIS Engine 平台构建一个城市燃气管网火灾传播定量分析系统。通过实验验证, 本项目提出的方法能够对潜在危险地区进行有效预测, 并能够对潜在危险地区进行风险评估、安全教育, 甚至是二次规划与改造, 能够有效的防范突发事件, 防范于未然。

关键词: 城市天然气管网; 火灾定量风险分析系统; 泄漏量; 实现

在大范围的城市天然气管网建设和运行过程中, 因天然气泄漏而引发的火灾、爆炸等事故时有发生。据统计, 近些年来, 莫斯科天然气管道在发生泄漏和爆炸, 导致莫斯科出现自第二次世界大战后最大的一次城市火灾; 我国输油管道在青岛市黄岛区发生了一起爆炸事故, 造成 62 人丧生, 136 人受伤, 造成了 7.5 亿元的直接经济损失。目前国内外对天然气管道泄漏、储罐池火和爆炸等问题极其重视, 而且有较多研究, 而对天然气泄漏引起的城市建筑火灾的研究较少。本项目旨在为天然气管道火灾风险的量化评估提供科学依据, 为天然气管道火灾风险的预评估提供科学依据。

1 研究现状

目前, 对于油气管道的安全风险评估已有较多的研究成果。从上个世纪七十年代起, 美国在石油天然气管道系统中开展了基础要素分析, 并对其进行了初步的风险评估。Wkent Muhlbaue 首先提出了石油和天然气管线的量化风险评估方法, 该方法得到了世界范围内的广泛认可, 并被用来开发风险评估软件^[1]。国内外许多学者利用 GIS 技术, 利用量化的风险评估手段, 构建了多种油气管道安全预警系统。潘家华第一次向国内的同行们介绍了美国专家的评分方式。中国安全生产科学研究院危化品安全技术研究所已开发出一套基于 CASST-QRA 的重大危化品区域风险量化评估软件, 并在此基础上进行了应用。在众多的研究和分析中, 对城市天然气管道进行量化的风险评估是一种有效的方法。

针对城市火灾的传播过程, 众多学者建立了多种模型, 并将其划分为三种类型, 即经验模型、概率模型和物理模型。本文提出了一种利用现有的震害资料进行统计分析, 得出一套经验公式。在此基础上, 提

出了一种基于概率和统计分析的概率模型, 并将其应用到建筑间距离的计算中。物理模型在应用过程中是以城市火灾蔓延的机理为基础, 利用火灾发展过程中物质、能量与组分平衡的原理, 来推导蔓延方程。

2 方法与模型

2.1 天然气管网火灾风险评价模型

2.1.1 泄漏量计算

在管网故障类型中, 渗漏是最普遍的一种。不同直径的孔洞模型, 其泄露量的计算方式也不尽相同。在条件许可的情况下, 可以用低压恒温稳一维绝热小孔模型来模拟。以下将重点讨论小孔模型^[2]。假定通过小孔的漏气满足一个理想的漏气状态方程式, 则由伯努利方程得到泄露流量的公式为:

$$q = pA \sqrt{\frac{2kM}{(k-1)RT} \left[\left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_0}{p} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}$$

在这个公式中, q 是漏气流量, 单位为 (kg/s); p 表示的管中压力, 单位为 Pa; A 表示管道破裂面积, 单位为 m^2 ; M 是管中气体的分子量, 单位为 kg/mol; R 是气体常数; T 是管中气体的温度; p_0 表示的环境压力; k 是绝热系数, 是等容比热容和等压比热容之比。

2.1.2 管网失效率计算

输气管道的破坏方式一般是由外部因素引起的, 也可能是由管道本身的内在风险引起的。一般用一年内每一段管道发生的故障次数来表示管道失效率。EGIG 的统计结果表明, 第三方损伤是导致输水管道失效率提升的主要因素^[3]。

2.1.3 火灾效应分析

危险品泄露后, 由于引燃因素的存在, 可能引发火灾。按照以往的经验, 火势可以划分为 3 种模式, 分别是: 火球式、喷射式和闪光式。由于天然气管道

发生故障而引起的火灾，大多数情况下都是以喷射火的形式发生。在射焰模型中，对于某一位置的靶材，其所受热辐射的通量可以用以下公式表示：

$$Q = \frac{\gamma \tau q H_c}{4 \pi r^2}$$

在这一公式中，Q 表示的热辐射，是以 W/m^2 为单位；用 0.2 表示辐射系数；用 1 表示大气压的投影系数；q 是泄露流量，单位为 kg/s ； H_c 是以 5.56×10^4 表示的天然气的燃烧热；r 表示距离，单位为 m。

2.1.4 事故影响分析

在对高危区进行识别时，根据物理效应模型中的热辐射计算公式，选取对应的损伤准则，获得损伤半径的分级，进而对具体场所的人员、建筑等进行仿真。热辐射对人体，建筑物和设备造成的损害如表 1 所示^[4]。

表 1 火灾热辐射对人体、建筑 / 设备的伤害情况

热流 (kW/m ²)	对人体伤害	对建筑 / 设备伤害	损失等级
37.5	1% 死亡 / 10s 100% 死亡 / 1min	操作设备全部损坏	A
25	重大损伤 / 10s 100% 死亡 / 1min	无火焰时， 长时间辐射以后 木材燃烧的最小能量	B
12.5	一度烧伤 / 10s 1% 死亡 / 1min	有火焰时，木材燃烧， 塑料熔化能量最低	C
4	20s 以上能够 感觉疼痛	玻璃破碎 / 30min	D
1.6	长期辐射情 况下无不舒适		E

该模型不仅能够现实条件下，对已经发生事故的网点进行伤害情况的仿真，也能够提前对要重点保护的对象展开分析，从而得到人体、建筑物可能受到的伤害，还能够对整个城市的天然气管网进行危险距离缓冲分析，选出城市中由于管线事故有较大危害的建筑。

2.2 城市火焰蔓延模型

已有的城市火传播模式大都是以震后的次生火灾为研究对象。以此为基础，以燃气火灾为研究对象，建立了建筑内火蔓延过程。

2.2.1 建筑物内部火灾发展模型

在天然气火灾风险评估模型中，选择具有较大火灾危险性的建筑物为初始发生火灾的建筑物。之后发生火灾的建筑，是由建筑物之间的火灾传播和蔓延，在未发生火灾的建筑接受到足够的热量，达到火灾发生的条件时，判断为火灾。该模型把每一座着火的建筑都大致看作一个点火源，将着火的发展分为 5 个阶段，即着火、轰燃、完全发展、坍塌和熄灭。为使模型简单化，在专家建议的基础上，只将建筑的结构类型以及基本的环境参数考虑在内，对火灾蔓延到整个建筑物所需要的时间做出一个大致估计^[5]。

2.2.2 建筑物间火灾蔓延模型

当整个建筑内的火情达到完全发展阶段后，火情就会向相邻建筑内蔓延，造成大面积蔓延。在本论文中，我们使用了由多个提出并进行了修正的理论模型。其中，热辐射、热羽流及飞火扩散是数值模拟的重点。在这些因素中，热辐射为主要传播途径，热羽流为主要传热途径，飞火传播因其具有一定的不确定性而被忽略。

2.2.2.1 热辐射

将着火建筑作为一个总体，通过对窗户火源及外部的辐射量进行换算，得出着火建筑对外部环境的辐射力，可以通过以下方法进行简单分析：

$$q_R = \frac{q_D A_D + q_w (A_w - A_F) + q_F A_F}{A_D + A_w}$$

$$= \frac{1}{\phi} \frac{q_D A_D}{A_n + A_w} = \frac{k}{\phi} q_D = \frac{k}{\phi} \sigma T^4$$

其中， q_D 是以 kW/m^2 为单位从窗户发出的室内烟雾的辐射强度； A_D 是以 m^2 为单位的窗面积； q_w 是以 kW/m^2 为单位的外墙的辐照强度； A_w 是以 m^2 为单位的外墙面积； q_F 是以 kW/m^2 为单位的喷射火焰的辐射强度； A_F 是以 m^2 为单位的火源面积；其中，火源与外墙辐射在总辐射中所占比例为 0.8；k 为建筑物外部的窗户面积，通常办公楼面积为 0.4，居民楼面积为 0.2； σ 为斯蒂芬 - 玻尔兹曼参量；T 表示房间内的烟道气温度^[6]。

2.2.2.2 热羽流

以竖直的热羽流轴上的温度作为模拟值，在风的影响下，该热羽流轴上的温度 ΔT_0 (K) 为：

$$\Delta T_0 = 24 (x/Q_0^{2/5})^{-5/3}$$

在这一公式中，x 为烟羽的轴上的任何一点到着火建筑物中心点之间的距离，单位为 m； Q_0 为燃烧建

筑物的热能释放速率 (kW)。

假定在有风的情况下,沿热羽流方向的温度分布是恒定的。因此,当一个建筑处于下风方向且与该热羽的轴相隔一段距离时,该建筑因该热羽而上升的温度可通过下列公式来计算:

$$\Delta T(r) / \Delta T_0 = \exp[-(r/b)^2]$$

在这一公式中, r 为从下风方向的建筑中心到热羽轴线的垂直距离,单位为 m ; b 为以 m 为单位的羽状物半径。因为风速远大于热羽流,所以可以忽略热羽流对风速的影响。

该模式必须先求出羽流在环境风力 U_∞ (m/s) 下的倾角 θ , 才能求出 r 。

$$\tan \theta = 0.1[U_\infty (Q_g/P_\infty C_p T_\infty)^{1/3}]^{-3/4}$$

在这一表达式中, Q 为以 kW/m 为单位的每一段的热量释放速率,并且 $Q = Q_0/\sqrt{A_{\text{floor}}}$, A_{floor} 为以 m^2 为单位的火灾建筑物的底板平面区域; P_∞ 以 kg/m^3 为单位表示环境中的空气密度; C_p 为热烟道的比热 ($kJ/kg \cdot K$); T_∞ 为外界气温,单位为 K 。

由于下风向建筑物受多股热羽的影响,且各股热羽间的相互作用十分复杂,本项目将下风向建筑物的加热看作是多股热羽的加热叠加,以简化模型。从以下公式中可以计算出在下风方向上的建筑物的温度 $\Delta T(K)$:

$$\Delta T = \left[\sum_{i=1}^n (\Delta T_i)^{3/2} \right]^{2/3}$$

其中, T_i 为在单独的羽流活动中以 K 为单位的升温度; N 是对建筑物联合作用的羽流数量。

3 GIS 模拟实验

GIS 作为一种新兴技术,已经在城市天然气管道系统中得到了广泛的应用。以上文内容为基础,提高 ArcGIS Engine 组件包和 C#.NET 开发平台,将某区域的燃气管网数据作为试验数据,构建出了一种城市天然气管网的消防量化风险评估系统^[7]。

在试验的条件下,在 $300mm^2$ 的泄露区域中,在管道的内部压力为 $101325 \times 4Pa$,气体的温度为 $20^\circ C$,风速为 $2m/s$,风向为西北,泄露的模式是一个小孔模型,当泄露的时间为 $5min$ 时,计算出了火灾对建筑 C 级的影响半径为 $8.37m$,对市政管网进行损害距离的缓冲分析,从中挑选出在损坏区域中的木材房屋,从而确定受到市政管网事故的有可能被引燃的木材建筑。此外,以 A 类致命伤为基准,反向推算出的杀伤半径为 $4.38m$,杀伤区域为 $60.49m^2$ 。以火险房屋为起

始点火的室内,对其进行蔓延的模拟,除以上的参数之外,还将其设定为 $2m/s$,风向为东北,进行 $120min$ 的模拟,这样就可以得到火焰蔓延的最后结果,对 6 处起火地点的建筑物进行了统计。

4 结束语

城市燃气管道突发事件往往伴随着火灾和爆炸等重大灾害,其潜在的破坏性很大。本课题将对现有的燃气火灾风险评估与城市火蔓延仿真模型进行归纳与归纳,采用量化的风险评估方法对燃气火灾对城市火蔓延的影响进行评估,在此基础上,针对燃气泄漏这一特定环境,建立适合于城市火蔓延的预测模型,并利用 C# 程序与 ArcGIS Engine 技术,构建燃气管道事故量化的风险评估系统。该系统可对燃气管道火灾的发生和蔓延范围进行预测,并可为燃气管道的改造和改建提供参考。当前,该模型仍处在初步建立阶段,仍存在着火灾风险传播、预警与应急联动、火灾蔓延等难点问题。本文认为,在今后的工作中,还需要继续深入研究,以构建一个更为科学有效的管网综合监测体系,为防灾减灾工作提供可靠的信息,以预防和抵抗潜在的重大灾害。

参考文献:

- [1] 张玮,程承旗,李爽.城市天然气管网火灾定量风险分析系统研究与实现[J].地理信息世界,2019,26(1):87-91,103.
- [2] 安金钰.基于风险损失最小化的城市天然气管网布局优化方法研究[D].重庆:重庆大学,2018.
- [3] 周星,郝永梅,杨健,等.天然气管廊爆炸特性及泄爆技术研究综述[J].工业安全与环保,2022,48(11):1-4,8.
- [4] 赵勇.天然气管道储运过程中的安全管理探究[J].石化技术,2019,26(1):179,189.
- [5] 李亚东.天然气管束气瓶拖车城市道路运输的安全性简析[J].中国石油和化工标准与质量,2018,38(15):64,67.
- [6] 蒋宏业,李文倩,张永城,等.冷放空天然气火灾爆炸事故影响范围模拟[J].西南石油大学学报(自然科学版),2022,44(5):151-158.
- [7] 梁清荃.天然气站场火灾、爆炸事故危险度的定量评价[J].化工技术与开发,2019,48(4):72-75.

作者简介:

何杭程(1982-),男,汉族,浙江富阳人,本科学历,研究方向:防火监督。