

doi:10.3969/j.issn.1671-5152.2013.01.002

# 城市中高压燃气管道泄漏、火灾事故风险分析

□ 公安部天津消防研究所 (300381) 刘晔亚 许晓元 纪超  
□ 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室 (230026) 王昌建

**摘 要:** 本文在对百余例城市中高压燃气管道泄漏、火灾以及爆炸事故统计的基础上,对城市中高压燃气管道泄漏、火灾及爆炸事故场景进行了分析,利用FLUENT对天然气中高压管道泄漏及爆炸事故危险性进行数值计算分析,采用故障树分析方法对城市中高压燃气管道灾害性事故的影响因素以及降灾因素进行了讨论,并对城市中高压燃气管道泄漏、火灾事故风险及其控制措施、策略进行了研究。

**关键词:** 事故统计 中高压燃气管道 故障树 降灾因素 风险分析

随着经济的发展,人们对石油、天然气的需求日益增加,石油与天然气工业在整个国民经济中的地位日益重要。20世纪90年代以来,我国天然气管道工业得到快速发展,天然气消费领域逐步扩大,城市燃气、发电、工业燃料、化工用气大幅度增长。城市燃气管网是城市的重要基础设施之一,担负着输送能量的工作,是城市生存和发展的必要保障,被称为城市的“生命线”。随着经济的快速发展,城市规模的不断壮大,城市燃气管网改扩建也刻不容缓。尤其近年来许多城市也如火如荼地开展了大规模的“煤改气”工程,大量燃气管网基础设施建设以及燃煤供热锅炉改燃或并网改造工程都在同期进行。特别是在中心城区的高压燃气输送管道的敷设,使得城市燃气管网运行的安全性问题日益突出。城市天然气供应系统普遍具有持续性(供应不能中断)、开放性(管道铺设在城市的大街小巷)、隐蔽性(管道埋设地下)、危险性(天然气泄漏或使用不当后极易造成事故)和长期性(使用时间长)的特点,由于长期受到地下外部土壤和内部介质的强烈腐蚀,大量燃气一旦发生泄漏,不仅造成能源浪费、环境污染,还将严重威胁城市周边建筑物及人员和财产安全。而且随着城市拆迁建设规

模的不断壮大,中高压城市燃气管线在城市建设中遭受破损的事故案例逐年增多,由此引发的大规模火灾爆炸事故也多有发生,特别在城市人口密集地区,事故往往会造成严重的人员伤亡及重大经济损失,并会带来恶劣的社会反响<sup>[2]</sup>。

目前,国外对燃气管道的风险分析已开展了很多研究,天然气管道风险分析已经逐步规范化。如1992年W.Kent. Muhlbauer详细阐述了天然气管道评估模型和各种评估方法,并在总结美国前20年油气管道风险研究工作的基础上提出了一种基于管道相对风险数的管道危险度评价方法<sup>[3, 4]</sup>。英国健康与安全委员会研发了用于计算管道失效风险的MISHAP软件包,可用于评估某地区的个人风险及社会风险<sup>[5]</sup>。而我国在油气管道风险分析方面的研究起步较晚,近年来,一些学者对城市燃气管道的风险分析、泄漏后果模型与计算、燃气火灾爆炸事故分析做了大量研究工作。于京春等人<sup>[6]</sup>分析了我国城市燃气管网的现状,评述了国内风险评估的研究进展,提出了深入完善和发展城镇燃气管网风险评估管理技术的建议;曾静<sup>[7]</sup>对长输天然气管道及城市燃气管道的区别进行了分析,并对肯特法、模糊综合评价法在城市燃气管

道方面应用的适应性进行了分析；刘斐等人<sup>[8]</sup>对城市管线发生泄漏的事故概率及其后果进行分析，在此基础上对个人风险和社会风险的进行定量分析，并基于个人风险的可接受水平制定人员不受伤害的管道安全距离，为管道的管理及规划提供依据；刘斐等人<sup>[9]</sup>还对城市输气管线的失效概率及失效后引发火灾的可能性进行估算，提出了失效后的泄漏流量简化计算模型，并在此基础上运用热辐射模型估算事故的伤害破坏半径；王凯全<sup>[10]</sup>根据国内城市高压天然气管道特点对管道风险分析的肯特模型加以改进，使其成为适用于城市天然气管道的风险分析法；柳红卫<sup>[11]</sup>通过改进肯特模型并结合风险矩阵的方法提出了城市天然气埋地管道半定量风险评估方法；张甫仁等人<sup>[12]</sup>提出了基于降灾因子的燃气事故概率综合评价方法，其值取为0.1~0.3；隋楠等人<sup>[13]</sup>论述了肯特法对于我国城市燃气管网的不适用之处，并从管道的历史泄漏记录、蓄意破坏的损失特点、环境风险、工作压力与人为误差等方面提出了对肯特评分法指标体系的修正；蒋宏业，姚安林<sup>[14]</sup>等人分析了城市燃气管道气体泄漏后发生火灾事故的各种后果危害，并对各种危害进行了详细的定量分析；朱伯龄等人<sup>[15]</sup>研究了气体泄漏扩散过程及影响因素；向素平等<sup>[16]</sup>基于流体状态方程、质量守恒方程、能量方程和动量方程，结合实际情况，建立了天然气管道泄漏模型；杨维<sup>[17]</sup>采用事故树分析法，给出了燃气管道泄漏事故树模型，并分析了导致燃气泄漏基本事件的重要度，提出了安全措施；沈斐敏，伍良<sup>[18, 19]</sup>对城市燃气管道火灾爆炸事故进行了事故树分析，指明了预防事故发生的可能途径，并给出了预防城市燃气管道发生火灾爆炸事故的预防措施。

本文搜集了近年来百余例城市中高压燃气管道泄漏、火灾、爆炸事故，基于案例统计的结果，利用事件树的方法分析了城市中高压燃气管道发生泄漏后事故发展场景，采用故障树分析方法对中高压燃气管道灾害性事故的影响因素以及降灾因素进行了讨论，并在此基础上提出城市中高压燃气管道风险分析中降灾因子模型，利用FLUENT对天然气中高压管道泄漏及爆炸事故危险性进行数值计算分析，并对城市中高压燃气管道泄漏、火灾事故风险及其控制措施、策略进行了研究。

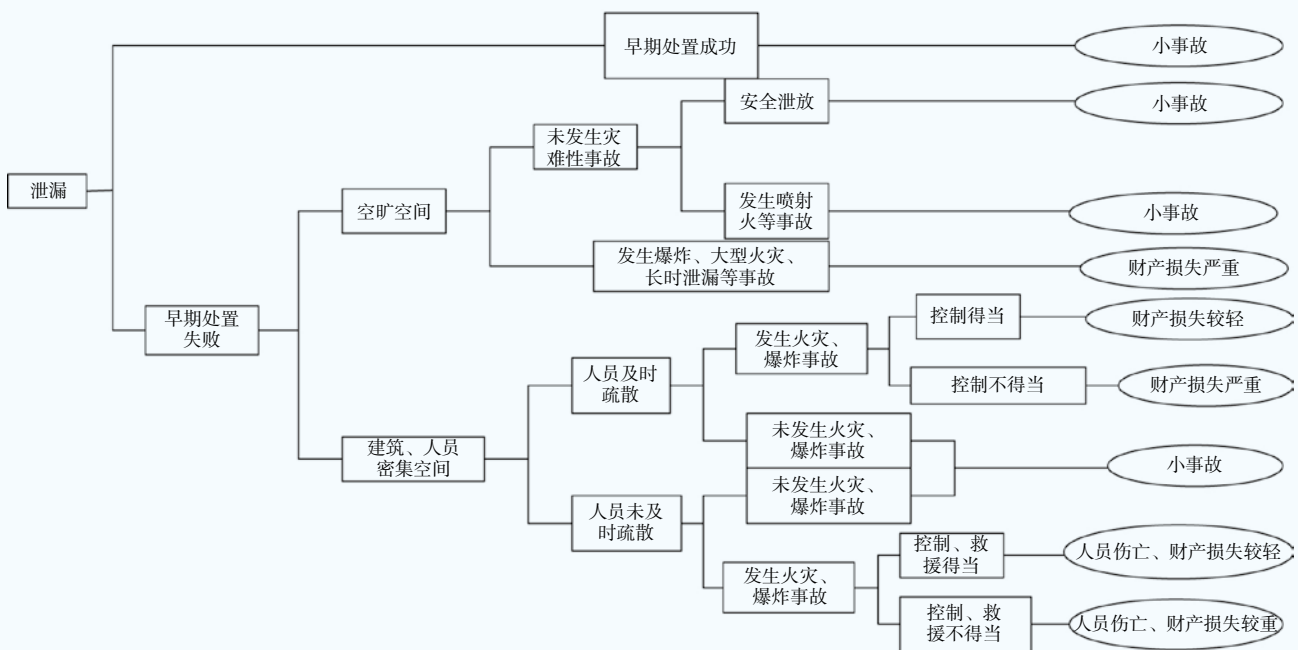
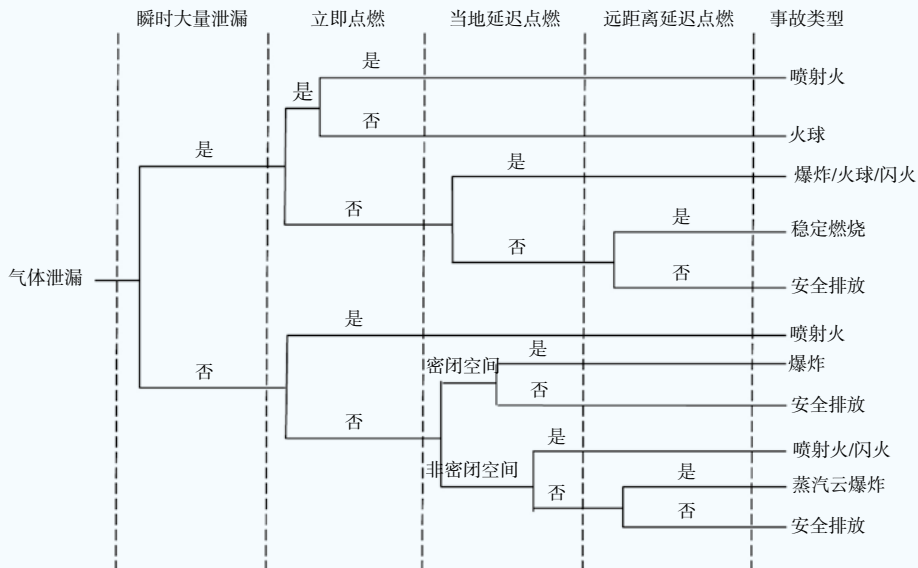
## 1 城市中高压燃气管道泄漏事故场景分析

通过对近200例国内外燃气管道泄漏、火灾爆炸事故案例的统计分析，由于第三方破坏、腐蚀等原因会发生泄漏、穿孔、破裂等失效模式后，当遇到点火源时通常会发生喷射火、火球、闪火、蒸气云爆炸等危害模式。燃气泄漏事故类型事件树分析见图1。当管道遭到破坏发生瞬时大量泄漏时，如果立即被点燃，在燃气与空气混合均匀的情况下会发生喷射火事故；燃气与空气混合不均匀时则会发生火球事故；如果大量泄漏的燃气未被立即点燃，而是在当地扩散形成气云后被点燃，则会发生爆炸、火球或闪火等事故。当泄漏天然气扩散至密闭空间或受限空间后，遇到点火源则会发生爆炸事故，这种发生在限制空间内的爆炸破坏性较强，往往导致建筑物倒塌，从而可能产生较大的人员伤亡。天然气泄漏形成可燃气体云爆炸、燃烧产生的爆炸冲击波以及大量热辐射形成的热伤害会对人员生命财产安全产生重大威胁，其形成爆炸火球或爆炸冲击波影响范围和程度由天然气泄漏速率、暴露时间、环境条件以及点火能量等参数所决定。

城市燃气管道一旦发生泄漏，如果人为控制得当，将会安全泄放，仅造成较小的经济损失；如果破损孔洞较大、管道压力大造成泄漏未被及时控制，遇到点火源将会发生爆炸、火灾事故。通过对搜集的百余例城市中高压燃气管道事故发展过程的统计分析，构建如图1所示城市中高压燃气管道泄漏发展事件树。城市中高压燃气管道泄漏灾害性事故共分5个阶段：泄漏，早期处置失败，人员未被及时疏散，发生火灾、爆炸等次生灾害，控制、救援不得当。

## 2 城市中高压燃气管道泄漏、火灾及爆炸灾害后果分析

为了对中高压天然气管道泄漏的火灾、爆炸危险进行深入研究，本文采用并行计算技术以及FLUENT模拟软件，针对钢质天然气中高压输送管道泄漏条件下的天然气泄漏扩散过程，以及意外点火引起的火灾、爆炸事故演化过程进行数值模拟，分析天然气高压喷射气流扩散以及气云爆炸影响范围。根据目前城市市



区内广泛使用的中高压燃气管道类型，针对运行压力为6.0MPa、4.0MPa和1.6MPa，管径分别为DN900、DN500和DN300的中高压天然气输送管道（管壁厚度分别为10mm、8mm），埋地深度1.2m，泄漏点孔径为100mm、30mm的管道泄漏气云扩散范围以及发生火灾、爆炸的影响范围进行模拟。

天然气中高压输送管道泄漏后，无风条件下，在大气中以射流的方式存在（如图3所示）。根据其

爆炸性，可以分为4个区域：（1）高天然气浓度区：当空气中天然气浓度达25%~30%时，可引起头痛、头晕、乏力、注意力不集中、呼吸和心跳加速、共济失调。若不及时脱离，可致窒息死亡。当浓度大于30%，在较短的时间内就会窒息死亡；（2）中浓度区（15%~25%）；（3）爆炸极限范围区（5%~15%）：在该浓度范围内，遇热源、明火或其它点火源有燃烧爆炸危险；（4）低天然气浓度区；

(5) 无天然气区。由于无风的影响,天然气在水平方向扩展区域较小,主要向高度方向扩散。因此,本项目主要分析天然气扩散特征及(1)区和(3)区的高度和宽度随时间的变化。

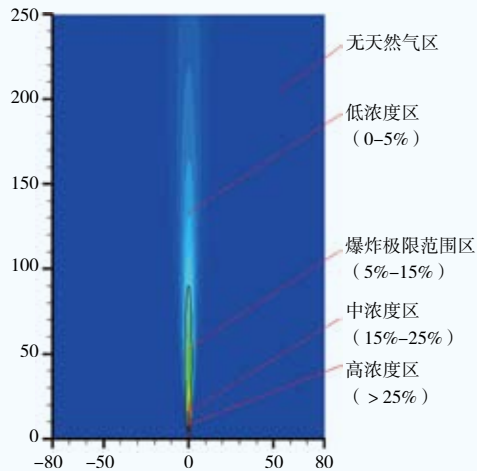


图3 泄漏后天然气浓度分布

DN900在运行压力6.0MPa,输气能力为74.3万 $\text{m}^3/\text{h}$ 的高压天然气输送管道(管壁厚度10mm),埋地深度1.2m,泄漏点孔径30mm时,天然气泄漏口速度较大,属超声速天然气气流在空气中的射流扩散,因此,在高度方向的扩散远大于在水平方面的扩散。如图4所示,在泄漏5s时,天然气高度已达150m;25s天然气已扩散至大于250m的高空;50s其在250m下的空间扩散形状趋于定常,即形状随时间推移基本一致。图5给出了泄漏口100mm、30mm条件下天然气泄漏(1)区、(3)高度和宽度随输送压力的变化曲线图。从模拟计算结果可以看出,随着输送压力的增大,在相同泄漏口条件下,泄漏天然气流量增大,导致(1)区、(3)高度和宽度增大。图6给出了天然气泄漏(1)区、(3)高度和宽度随泄漏口直径的变化趋势图,图中表明:在相同输送压力下,泄漏口直径增大,相当于泄漏天然气流量增大,导致(1)区、(3)高度和宽度增大。

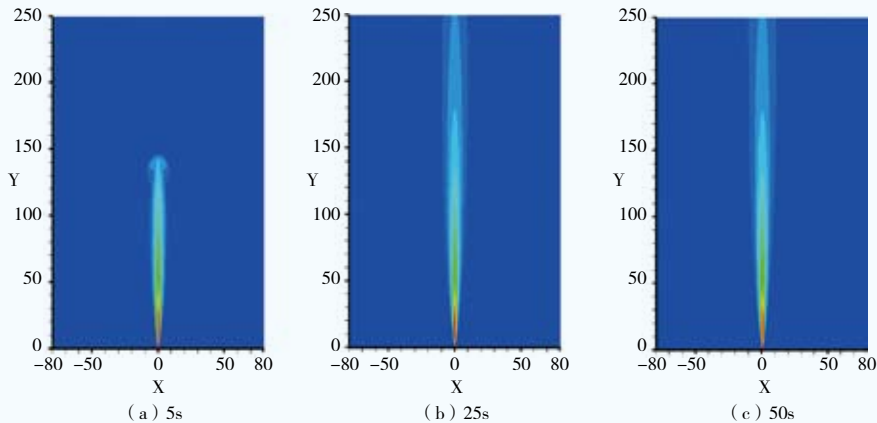


图4 6.0MPa高压管道泄漏天然气扩散分布图(全浓度范围)

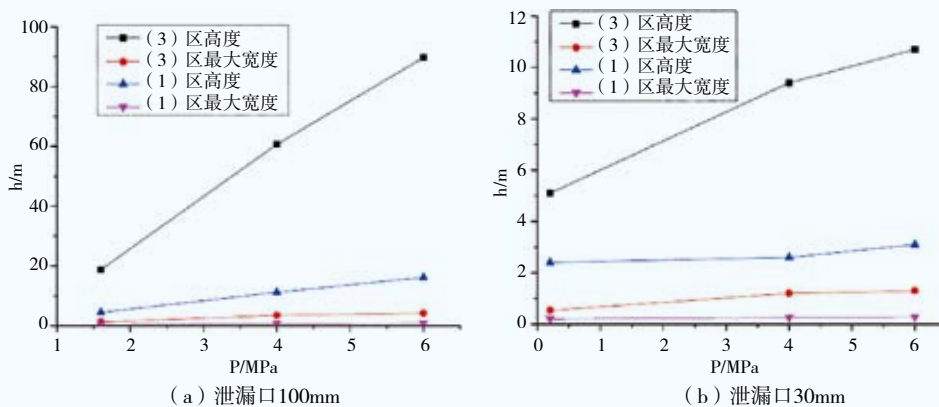


图5 天然气泄漏(1)区、(3)区高度和宽度随输送压力的变化曲线图

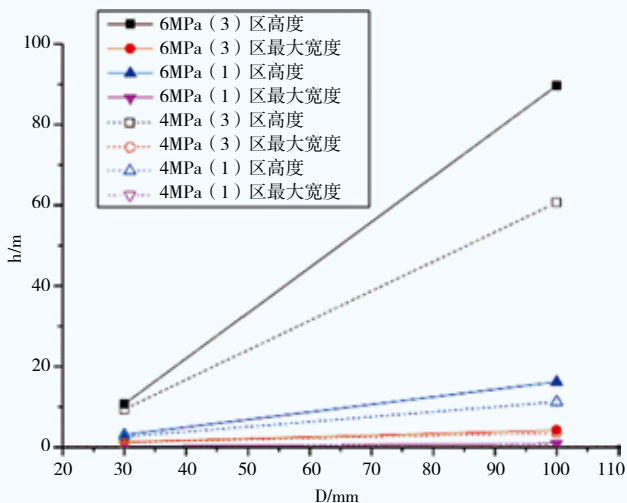
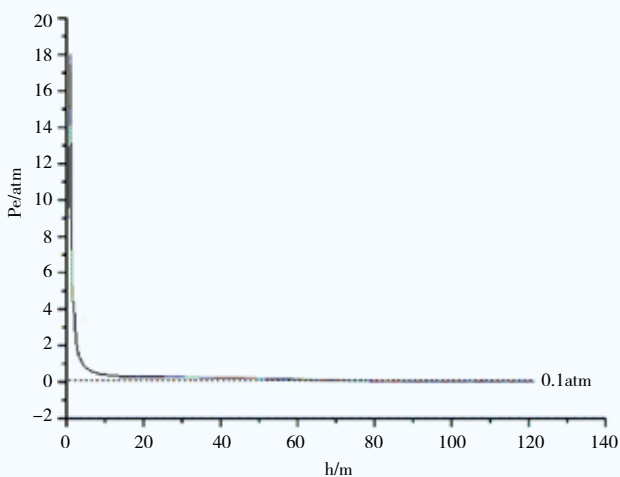


图6 天然气泄漏(1)区、(3)区高度和宽度随管道输送压力的变化趋势图

泄漏天然气发生燃烧爆炸时，爆炸气云将形成巨大破坏作用的爆炸超压，当超压0.1atm时，就可造成桥梁、救生艇等破坏；当超压0.35atm时，可以将户外人员吹走或埋入废墟，具有50%的致命率，可严重破坏建筑物或工厂。通常以超压0.1atm作为危险的临界条件。图7给出了DN900运行压力6.0MPa，输气能力为74.3万m<sup>3</sup>/h的高压天然气输送管道泄漏点孔径100mm，泄漏时间10min条件下，气云爆炸最大超压随高度以及水平距离的变化曲线。图中计算结果表明：在初始点火后，迅速形成爆轰，并达到约18atm的超压；随着高度的增加，超压先明显衰减，随后缓慢衰减，大约距地面66.5m高度超压衰减至0.1atm。



(a) 高度方向超压变化曲线

水平方向，在点火点附近，由于爆轰的存在，超压高至约18atm左右；随着远离点火点，超压也是先明显衰减，随后缓慢衰减，在距离点火点15.6m处，超压降至0.1atm。

考虑到风速以及环境条件对天然气泄漏扩散的影响，高度方向保守安全系数为2，水平方向保守安全系数取为4，则高压天然气管道泄漏爆炸的最小安全距离如表1所示。而在天然气泄漏点源的常年风向向下风向位置，水平方向的安全距离则应适当增大。

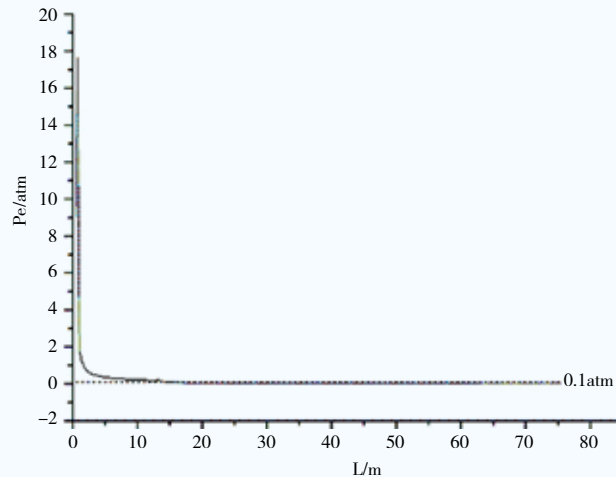
表1 高压天然气管道泄漏爆炸的安全距离(m)

工况	高度方向安全距离	水平方向安全距离
DN900, 6.0MPa	330	62.4
DN500, 4.0MPa	98	56.8

### 3 城市中高压燃气管道泄漏灾害性事故影响因素以及降灾因子分析

#### 3.1 城市中高压燃气管道泄漏灾害性事故故障树分析

针对城市中高压燃气管道泄漏、火灾爆炸灾害事故，利用故障树方法可对灾害事故场景各阶段的发生原因进行分析，图8为泄漏故障树，图9为发生爆炸、火灾事故故障树。将故障树中基本事件列入表2。为了更为简洁的绘制故障树，用“代码”来表达各影响因素，“代码”与顶上事件相对应。



(b) 水平方向爆炸超压变化曲线

图7 6.0MPa DN900的高压天然气输送管道泄漏时最大超压沿高度方向和水平方向与点火点距离的变化曲线

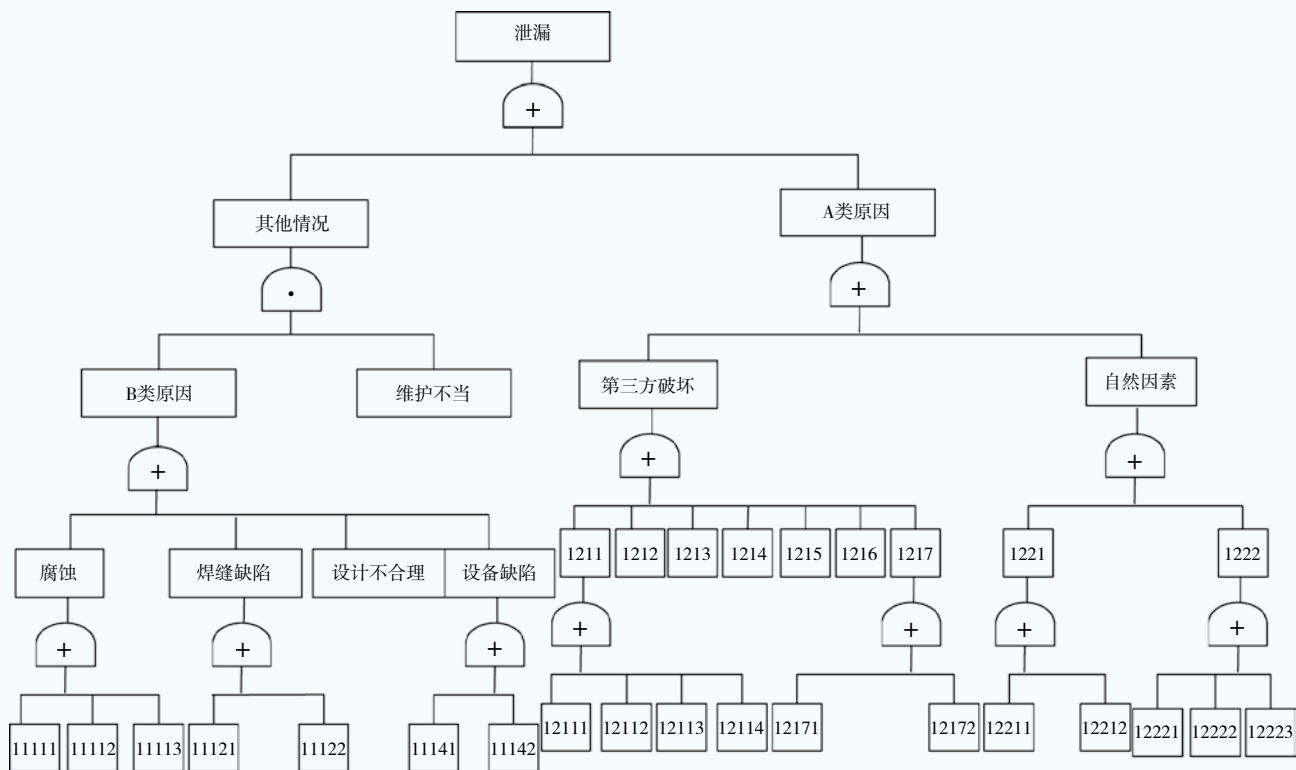


图8 城市中高压燃气管道泄漏故障树

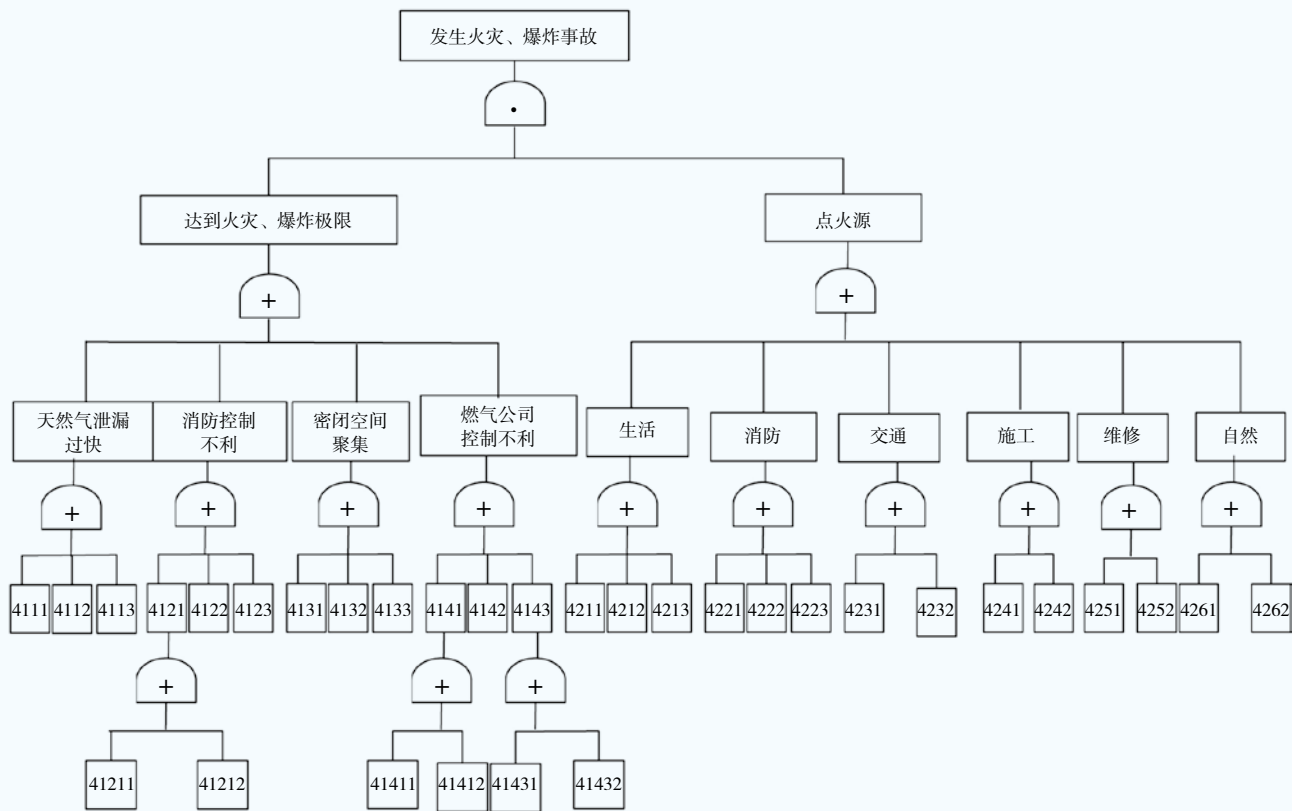


图9 发生火灾、爆炸事故故障树

表2 故障树基本事件列表

泄漏事故树	11111: 材料缺陷	发生火灾、爆炸事故	4111: 孔洞大 4112: 管道直径大
	11112: 燃气质量差、含硫量高		4113: 管道压力大 4121: 处置方法不当
	11113: 土壤条件差 11121: 材料缺陷		4122: 未及时赶到 4123: 未及时通知燃气公司
	11122: 施工质量差 11141: 选型不合理		41211: 稀释不利 41212: 未及时合理的通风
	11142: 设备质量差 1211: 施工外力破坏		4131: 密闭空间 4132: 燃气聚集
	1112: 违规占压管线 1113: 偷盗		4133: 未通风 4141: 操作失误
	1114: 人为故意破坏 1115: 恐怖主义		4142: 未及时赶到 4143: 不能正常关闭阀门
	1116: 袭击 1117: 重物碾压		41411: 疏忽大意 41412、41432: 培训不到位
	12111、12171: 埋深不够		41431: 设计不合理 4211: 开灯 4212: 做饭
	12112、12172: 标志不明显		4213: 打火机 4221: 消防车、照相机、摄像机、手机对讲机等非防爆设备 4222: 化纤服装 4223: 金属工具
	12114: 手续不全 12113: 沟通不够		4231: 汽车打火 4232: 火车、汽车等之间的摩擦
	1221: 自然条件 1222: 地质条件		4241: 电焊 4242: 机械工具摩擦起火等
	12211: 温度极低或极高 12212: 大雨		4251: 维修工具摩擦起电
	12221: 洪水 12222: 地震 12223: 泥石流		4252: 维修时其他起电火花的情形
			4261: 雷击 4262: 静电或杂散电流

### 3.2 最小径集的计算

根据上文可知，“发生人员伤亡惨重、财产损失严重事故”的故障树可表示为：

$$P_{总} = P_A \cdot P_B \cdot P_C \cdot P_D \cdot P_E \cdot P_F$$

其中， $P_{总}$ 为发生人员伤亡惨重、财产损失严重事故的概率， $P_A$ 为发生泄露事故故障树的概率， $P_B$ 为早期控制不当故障树的概率， $P_C$ 为人员未及时疏散故障树的概率， $P_D$ 为发生火灾爆炸事故故障树的概率， $P_E$ 为控制救援不当故障树的概率， $P_F$ 为泄露事故发生在建筑物、人员密集空间的概率。

根据最小径集的求法，首先将故障树对偶成成功树，即把故障树的门换成与，可得：

$$P_{总}' = P_A' \cdot P_B' \cdot P_C' \cdot P_D' \cdot P_E' \cdot P_F'$$

其中， $P_{总}'$ 、 $P_A'$ 、 $P_B'$ 、 $P_C'$ 、 $P_D'$ 、 $P_E'$ 、 $P_F'$ 分别为  $P_{总}$ 、 $P_A$ 、 $P_B$ 、 $P_C$ 、 $P_D$ 、 $P_E$ 、 $P_F$ 的补事件。

经计算，顶上事故为“发生人员伤亡惨重、财产损失严重事故”故障树的最小径集为：

$$P_1 = \{11111, 11112, 11132, 11121, 11122, 11113, 11141, 11142, 12111, 12112, 12113, 1114, 1212, 1213, 1214, 1215, 1216, 12171, 12172, 12211, 12212, 12221, 12222, 12223\}$$

$$P_2 = \{112, 12111, 12112, 12113, 11114, 1212, 1213, 1214, 1215, 1216, 12171, 12172, 12211, 12212, 12221, 12222, 12223\}$$

$$P_3 = \{211, 2211, 2212, 2221, 2222, 2223, 223111, 223112, 223121, 223122, 223131\}$$

$$P_4 = \{211, 2211, 2212 \cdot 2221, 2222, 2223, 223111, 223112, 223121, 223122, 223131\}$$

$$P_5 = \{211, 22321, 22322, 22323, 22324\}$$

$$P_6 = \{211, 22321, 22322, 22323, 22324\}$$

$$P_7 = \{31, 33, 34, 35, 321\}$$

$$P_8 = \{31, 33, 34, 35, 322\}$$

$$P_9 = \{42_{所有火源}\}$$

$$P_{10} = \{2221, 2222, 2223, 223131, 223122, 223121, 41211, 41212, 4122, 4132, 4142, 4131\}$$

$$P_{11} = \{2221, 2222, 2223, 223131, 223122, 223121, 41211, 41212, 4122, 4132, 4142, 4132\}$$

$$P_{12} = \{2221, 2222, 2223, 223131, 223122, 223121, 41211, 41212, 4122, 4132, 4142, 4133\}$$

$$P_{13} = \{2221, 2222, 2223, 223131, 223122, 223121, 511, 512, 513, 514, 515, 516, 532, 541, 542, 543\}$$

$$P_{14} = \{F_{\text{建筑物, 人员密集空间}}\}$$

### 3.3 结构重要度的计算

结构重要度可表示基本事件对顶上事件的影响程度。针对顶上事件“发生人员伤亡惨重、财产损失严重事故”的故障树的基本事件的结构重要度,通过最小径集进行计算。

$$I(i) = \sum K_i (1/2)^{n-1}, X \in K \quad (1)$$

式中 $I_i$ ——基本 $X_i$ 的重要系数近似判别值;

$K_i$ ——包含 $X_i$ 的(所有)径集;

$n$ ——基本事件 $X$ ,所在径集中基本事件个数。

$$I(1) = I(3) > I(4) > I(2) > I(5)$$

根据结构重要度判定基本原则及近似判别公式,

对各基本事件结构重要度判别,排序如下:

$$\begin{aligned} I_F = I_{42} > I_{31} = I_{33} = I_{34} = I_{35} = I_{22321} = I_{22322} = I_{22323} > = \\ I_{211} = I_{212} > = I_{321} = I_{322} > I_{2221} = I_{2222} = I_{2223} = I_{223121} = I_{223122} = \\ I_{223131} > I_{41211} = I_{41212} = I_{4122} = I_{4123} = I_{4142} > I_{2211} = I_{2212} = \\ I_{223111} = I_{223112} = I_{4131} = I_{4132} = I_{4133} > = I_{511} = I_{512} = I_{513} = I_{514} = \\ I_{515} = I_{516} = I_{532} = I_{541} = I_{542} = I_{543} > = I_{12111} = I_{12112} = I_{12113} = \\ I_{12114} = I_{1212} = I_{1213} = I_{1214} = I_{1215} = I_{1216} = I_{12171} = I_{12172} = I_{12211} = \\ I_{12212} = I_{12221} = I_{12222} = I_{12223} > I_{112} > I_{11111} = I_{11112} = I_{11113} = \\ I_{11121} = I_{11122} = I_{1113} = I_{11141} = I_{11142} \end{aligned} \quad (2)$$

其中,由结构重要度的近似判别式

$$I(i) = \sum K_i (1/2)^{n-1}, X \in K$$

计算可得:

$$I_{2221} = I_{2222} = I_{2223} = I_{223121} = I_{223122} = I_{223131} = \frac{5}{2^{10}} \quad (3)$$

由式2可知,通过对城市中高压燃气管道泄漏灾害性事故故障树分析,结构重要度最为重要的前10个大类基本事件为:燃气泄漏事故发生在建筑物、人员密集场所,燃气泄漏后周围出现点火源,公众自救意识淡薄、疏散通道不畅、疏散宽度不够、人口密集过大,泄漏早期消防控制不利,未及时发现泄漏,消防、燃气公司未及时疏散人群,燃气泄漏过快,泄漏早期燃气公司控制不利,由于消防处置不利发生火灾、爆炸等次生灾害,群众发现泄漏后未报警。

## 4 基于场景分析的城市中高压燃气管道降灾因子模型研究

通过以上城市中高压城市燃气管道事故降灾因子分析,城市燃气管道个体风险可表示为:

$$R_{(x,y)} = \sum_s f_s v_s (1-h) = (f_{\text{火灾}} v_{\text{火灾}} + f_{\text{爆炸}} v_{\text{爆炸}}) (1-h) \quad (4)$$

式中, $R_{(x,y)}$ 为城市燃气管道事故在空间位置 $(x,y)$ 处所产生的第 $s$ 个情景事故风险值,事故场景包括燃气泄漏火灾和燃气爆炸事故; $f_s$ 为第 $s$ 个情景事故发生的概率值; $v_s$ 为第 $s$ 个情景事故发生时对在空间位置 $(x,y)$ 处所造成的严重度; $h$ 为考虑救降灾系统的完善度、应急能力等因素在内的降灾因子。

降灾因素主要包括以下几个方面:燃气管道信息状态与风险管理、预测预警技术的水平、消防队处置燃气事故的能力、燃气公司处置燃气事故的应急能力、医疗救援水平、安全管理及人民群众的消防意识等。因此,降灾因子可表示为:

$$h = \sum_i A_i h_i = A_f h_f + A_n h_n + A_m h_m + A_o h_o \quad (5)$$

其中, $h_i$ 表示燃气管道预测预警系数, $h_f$ 表示消防队救援系数, $h_n$ 表示燃气公司救援系数, $h_m$ 表示医疗救援系数, $h_o$ 表示其他方面降灾系数,如:管理、人民群众降灾所起到的作用; $A_f$ 、 $A_n$ 、 $A_m$ 、 $A_o$ 分别为各降灾因素降灾系数的权重值,通过3.3节灾害性事故各基本事件结构重要度排序可将 $A_f$ 、 $A_n$ 、 $A_m$ 、 $A_o$ 分别定为0.15、0.30、0.20、0.15、0.2。

消防队对燃气事故的降灾作用,表现为消防队的反应时间和消防队的装备及指挥人员的对灾害事故的处置能力两个方面。结合我国消防队到达现场所用的一般时间标准以及消防救援装备和指挥能力评判,消防队救援系数 $h_f$ 的取值见表3。

表3 消防队救援系数 $h_f$ 的取值

消防队装备及指挥员处置灾害事故的能力	10min	13min	15min
救援装备精良、指挥员处置灾害事故能力强	0.2	0.15	0.1
救援装备一般、指挥员处置灾害事故能力一般	0.15	0.1	0.05
救援装备差、指挥员处置灾害事故能力差	0.1	0.05	0

通过对所统计的城市中高压燃气管道事故中燃气公司处置情况进行分析可知,燃气公司对燃气事故的降灾作用,表现为燃气公司的反应时间和燃气公司对灾害事故的处置能力两个方面。表示燃气公司救援系数的取值见表4。

医疗机构对燃气事故的降灾作用,表现为医疗机构到达现场的急救反应时间和医疗设备的完善程度两个方面。根据急救时对伤者的救治效果,表示医疗救



援系数的取值见表5。

表4 燃气公司救援系数 $h_r$ 的取值

燃气公司处置灾害事故的能力	10min	20min	30min
良好	0.2	0.15	0.1
一般	0.15	0.1	0.05
差	0.1	0.05	0

表5 医疗救援系数 $h_m$ 的取值

医疗设备的完善程度	5min	8min	10min
良好	0.2	0.15	0.1
一般	0.15	0.1	0.05
差	0.1	0.05	0

燃气管道预测预警系数的取值根据燃气管道的预测预警技术完善程度确定,取值范围为0~0.2。人民群众降灾系数的取值根据燃气管道安全管理程度及燃气管道周围人民群众的消防意识来确定,取值范围为0~0.2。

## 5 结论

本文搜集了近年来百余例城市中高压燃气管道泄漏事故,利用事件树的方法分析了城市中高压燃气管道发生泄漏后事故发展场景,利用故障树分析方法对城市中高压燃气管道灾害性事故原因,以及城市燃气管道事故的降灾因素进行了分析,提出了城市中高压燃气管道风险分析中降灾因子模型。

通过数值模拟对城市中高压燃气管网泄漏、火灾爆炸灾害后果进行了分析,数值模拟的结果表明,随着天然气长输管道输气压力或泄漏口直径的增大,均能导致泄漏天然气流量增大,从而引起天然气云高、天然气浓度区、天然气爆炸极限区的高度和宽度增大,导致危险性增大。在天然气泄漏初始点火后,均可迅速形成爆轰,并达到约18atm的超压。随着高度或距离点火点水平距离的增加,超压先明显衰减,随后缓慢衰减;重力作用诱使燃烧区或高温区继续沿天然气云高度方向传播。本文数值模拟结果表明:在无风条件下,在高度方向上,高温区导致的危险性大于爆炸波。当发生爆炸时,增大输气压力,计算获得的高度方向安全距离明显增大。

## 参考文献

- 1 郑津洋,马夏康,尹谢平.长输管道安全风险辨识 评价控制[M].北京:化学工业出版社,2004
- 2 国辉.我国城市天然气管道事故统计及分析[J].事故分析与报到,2008;8(4):6-8
- 3 Muhlbauer,Pipeline Risk Management Manual, First Edition[M].Gulf Publishing Company,Houston, Texas, 1992
- 4 W.Kent Muhlaer, Pipeline Risk Management Manual,Second Edition[M].Gulf Publishing Company, Houston, Texas, 1996
- 5 赵永涛.油气管道风险评价现状及对策研究[J].石油化工安全环保技术,2007
- 6 于京春,解东来等.城镇燃气管网风险评估研究进展及建议[J].煤气与热力,2007;27(12):38-42
- 7 ZENG Jing,XU Jun-cheng,CHEN Guo-hu1,YUAN Jin-biao, Applicability of Risk Assessment Method for Urban Buried Gas Pipeline[J]; Gas & Heat; 2007; 5
- 8 刘斐,刘茂.城市燃气管线的定量风险分析[J].南开大学学报(自然科学版),2006;39(6):31-35
- 9 刘斐,刘茂.城市输气管线火灾事故的风险定量计算[J].安全与环境工程,2006;13(4):63-65
- 10 王凯全,王宁,张弛等.《城市天然气管道风险特征及肯特法的改进》[J].中国安全科学学报,2008;18(9):152-157
- 11 柳红卫.城市天然气管道半定量风险评估方法研究[J].中国安全生产科学技术,2006;2(3):96-100
- 12 张甫仁,邓盼盼,曾小燕.城市燃气管道事故综合评价方法[J].天然气工业,2009;29(2):98-101
- 13 隋楠,魏立新,隋溪等.《城市燃气管网风险评价体系研究》[J].油气储运,2010;29(1):12-14
- 14 蒋宏业,姚安林等.城市天然气管道泄漏区域危害程度分析[J].油气田地面工程,2008;27(4):38-39
- 15 朱伯龄,於孝春,李育娟.气体泄漏扩散过程及影响因素研究[J].石油与天然气化工,2009;38(4):354-358
- 16 向素平,冯良,周义超.天然气管道泄漏模型[J].储运与集输工程,2007;27(7):100-102
- 17 杨维.事故树在管道燃气泄漏事故分析的应用[J].煤气与热力,2007;27(5):51-54
- 18 沈斐敏,伍良.管道燃气火灾爆炸事故树分析(续)[J].工业安全与环保,2003;29(1):42-45
- 19 沈斐敏,伍良.管道燃气火灾爆炸事故树分析(续)[J].工业安全与环保,2003;29(2):37-41