

doi:10.3969/j.issn.1671-5152.2018.04.005

高压燃气管道泄漏事故疏散半径研究

□ 深圳市燃气集团股份有限公司(518049) 杨国增

摘要: 随着城市化进程的加速发展,现状高压燃气管道逐步由人口稀疏气度转变到城市繁华地带,深圳有300多km高、次高压燃气管线呈环状分布于深圳市人口密集区域,任何一处管道发生泄漏引发的气体扩散、火灾或爆炸都可能造成群死群伤事故,科学合理的计算事故影响范围是确定最佳疏散范围的必然举措。结合挪威船级社(NDV)开发的PHASK RISK软件定量开展评估,提出最佳疏散半径,对提高城镇燃气管网的日常安全管理和维护工作具有重要意义。

关键词: 高压燃气 管线 泄漏事故 疏散半径

1 概述

高压燃气管网呈环状分布于深圳市各区,总里程长达300多km,途经自然灾害地段、易发交通事故地段、第三方施工工地地段和多管线并行地段,临近重大目标区域日渐增多。人口密集区域、村庄、小区、商场、加油站、危险品仓库、化工厂、车站等地段在管线200m范围内均涉及地区等级的重大变更,都对高压管网危险程度提出了新的挑战。

当高压燃气管网发生泄漏时^[1],临近区域在可燃气体发生扩散后,都有可能引发火灾或爆炸事故,现场应急处置的首要任务就是对临近区域的人员进行疏散。那么,应该疏散多大范围的人员?哪些区域的人员会受到潜在伤害?这些涉及公共安全的严峻课题,必须经过科学的核算才能给出具体的答案。

2 PHAST和伤害准则

2.1 PHAST简介

PHASK RISK软件是由挪威船级社开发的专门用

于从事石油、天然气等领域的危险分析和安全计算的商业软件,拥有众多事故模型和比较全面的危险物质数据库,在安全管理和评价领域具有权威地位。该软件可以通过输入管道压力、天然气成分、存储参数,设定火灾爆炸方式,对周围环境^[2](大气温度、稳定性和风速)的真实场景进行模拟,得到事故影响范围,以彩色图标、曲线形式输出结果。

本次模拟需要用到的模块有泄漏模块、扩散模块、燃烧模块和毒气模型。泄漏模块用来计算燃气泄漏到环境中的流速等参数,扩散模块在确定天气情况下可以在泄漏模块的基础上计算出云团传播情况^[3],燃烧模块计算可燃性后果,用热辐射与冲击波超压表示,毒气模型用来计算气体浓度变化与毒气致死情况。

2.2 伤害准则

高压燃气管道泄漏后通常以爆炸和燃烧的方式对人员造成大规模伤害^[4],燃气爆炸形成冲击波对人员造成伤害,那么此时可以应用冲击波超压准备作为伤害准则,而燃烧则以热辐射的方式对人员造成伤害。

冲击波常见准则有超压准则、冲量准则和压力-冲量准则,本次定量研究以超压准则作为爆炸伤害准

则，计算冲击波对人员造成的死亡区、重伤区、轻伤区的分布半径。由于国内外对冲击波伤害程度没有统一的判断准则，本次参照国内行业标准《化工企业定量风险评估导则》AQ/T3046-2013第10.4.2条“对于蒸汽云爆炸，在0.03MPa超压影响区域内，人员的死亡概率为100%；在0.01MPa超压影响区域外，人员的死亡概率为0”，制定冲击波超压准则，见表1。

表1 导致人员伤害的冲击波超压标准

冲击波超压 (kPa)	对人员伤害影响
21	极严重，部分人员死亡
14-21	严重，可引起死亡
2-14	中等损伤
< 2	安全

热辐射对人体的伤害，主要是通过不同热辐射通量对人体的伤害程度来表示，伤害半径有一度烧伤（轻伤）半径、二度烧伤（重伤）半径和死亡半径3种。参照行业标准《化工企业定量风险评估导则》AQ/T3046-2013所列出的不同热辐射值对人体的伤害和周围设施的破坏情况列出热辐射伤害准则，见表2。

表2 不同热辐射值对人体的伤害

热辐射通量 (kW/m ²)	人体伤害类别
37.5	在1min内100%的人死亡，10s内1%的人死亡
25.0	在1min内50%的人死亡，10s内严重烧伤
12.5	在1min内10%的人死亡，10s内轻度烧伤
4.0	超过20s引起疼痛，但不会起水泡
1.58	长期接触不会有不适感

3 核算基础

3.1 核算基本数据

深圳市高压燃气管网中的气质成分主要是甲烷，如果发生泄露，遇到火花容易引起火灾或爆炸事故。对比国家标准《石油化工企业防火设计规范》GB50160-2008第3.0.1条表3.0.1“可燃气体的火灾危险性分类”和第3.0.2条表3.0.2“液化烃、可燃液体的火灾危险性分类”的规定，甲烷属于甲类易燃气体，

其危险特性如表3所示。

表3 甲烷的危险特性

物质	闪点	爆炸极限	火灾危险性	毒性
甲烷	-188℃	5.3%~15%	甲类	无毒

根据国家标准《输气管道工程设计规范》GB50251-2015第4.2.1条，输气管线通过的地区，应按沿线居民户数 and（或）建筑物的密集程度，划分为4个地区等级，并根据等级做出相应的管道设计。等级越高，燃气管道的设计要求越高，事故发生后引起的死亡、重伤、轻伤人数越多，但是对事故影响的空间范围则没有本质变化。

3.2 失效风险分析

根据美国石油协会标准《Risk-based Inspection Technology》API581-2008表31的推荐数据，不同管径的管道固有失效频率如表4所示。

表4 不同管径管道的失效频率

管道直径	固有失效频率（1年，4个孔）			
	6.35mm (1/4in)	25.4mm (1in)	101.6mm (4in)	管道破裂
406.4mm	1 × 10 ⁻⁷	2 × 10 ⁻⁷	2 × 10 ⁻⁸	2 × 10 ⁻⁸
> 406.4mm	6 × 10 ⁻⁸	2 × 10 ⁻⁷	2 × 10 ⁻⁸	1 × 10 ⁻⁸

行业标准《化工企业定量风险评价导则》AQ/T3046-2013推荐的点火概率取0.2，根据国际标准《Guidance for the determination of the required safety integrity levels》BS IEC 61511-3Part3附录F，危险源发生事故并导致某一个位置现场人员出现伤亡的概率R(x, y)，可以用公式1计算：

$$R(x, y) = \sum F_0 F_E F_M P_i V(x, y) \quad (1)$$

公式中：

R(x, y) ——危险源发生事故时，在人口密集场所位置(x, y)处出现伤亡事故的频率；

F₀ ——危险源因某种故障发生事故的原始频率；

F_E ——诱发设备出现故障的诱因频率，由于国际标准API 581-2008已经考虑了诱因，故取值为1；

F_M ——人员修正系数，指人员出现在事故现场的概率，取值为0.1；

P_i ——危险源泄漏时被点燃的概率,由于高、次高压燃气管道在户外,取0.2;

$V(x, y)$ ——危险源在点 (x, y) 处能够逃生的概率,爆炸时,现场人员逃生机会概率取值1;

Σ ——假设危险源发生事故时,每个故障发展为事故后果的总概率相加。

根据公式(1)可以计算深圳市高压燃气管道在不同孔径下泄漏时导致群死群伤的概率,计算所需基础技术罗列见表5:

根据表5所示数据进行计算,发现高压燃气管道发生小孔、中孔、大孔泄漏爆炸造成的群死群伤概率高于国家安全生产监督管理总局令第40号《危险化学品重大危险源监督管理暂行规定》的可接受风险 1.0×10^{-6} 。

3.3 核算设定数据

假设高压管道顶部破损,计算漏点距离地面高度0.1m,管沟覆土层基本不减弱泄漏强度。高压燃气管道的覆土层一般为1.5m左右,由于软件限制,不考虑覆土层对软件结果的影响。高压燃气管道在平地泄漏时,大部分孔径为垂直方向喷射;在高山斜坡等地段,喷射方向为水平喷射。由于天然气比空气轻,垂直喷射将向上部扩散,影响范围比水平喷射小,因此泄漏部位喷射方向选取水平喷射,已得到最恶劣工况的核算结果。参照《化工企业定量风险评价导则》AQ/T3046-2013对孔径的定义,燃气泄漏孔径按照小孔(5mm)、中孔(25mm)、大孔(100mm)和管道破裂(大雨100mm)分为4类。依据气象统计数据,当地平均风速(4.7m/s)下的最坏事故工况,统计不同风速(3m/s、8m/s、10.5m/s)下最坏事故工况的最坏后果。

DN800高压燃气管网参照管道设计压力4.0MPa进行设定,管径DN800,长度107km;管线属于天然气连续输送管线,组分100%位甲烷,温度为20℃。

4 定量核算

如果天然气发生持续泄漏,按照可燃气体发生泄漏的自然机理展开研究,分别从扩散半径、热辐射伤害半径和爆炸冲击波超压半径展开计算。

4.1 高压燃气扩散半径

如果燃气管道持续泄漏,由于当地风速的稀释作用,处于爆炸极限范围的可燃气体覆盖区域扩展到一定范围时,会形成动态稳定状态,不会继续扩大。因此,在定量分析中涉及到可燃气体扩散影响范围,一般选取可燃气体爆炸爆炸下限的一半(0.5LEL)、爆炸下限(LEL)和爆炸上限(UEL)3个参数作为评估指标。图1为风速4.7m/s时发生小孔泄漏时的扩散影响范围,表6为高压燃气管网可燃气体浓度扩散分析汇总表。

4.2 热辐射伤害半径

高压燃气管道在发生泄漏时有火源出现,极易引发火灾。由高压燃气泄漏引发的高压燃气在点燃后形成喷射火,在管道内部高压驱动下,喷射火受风速影响较小,在10.5m/s以下的风速下,三类伤害半径在软件模拟下基本一致,4.7m/s风速下小孔泄漏模拟图见图2,表7列出了不同孔径下高压燃气管道发生泄漏时在不用风速下的喷射火辐射强度。

4.3 爆炸超压伤害半径

在燃气管线发生泄漏后,甲烷在空气中扩散形成覆盖区域。覆盖区域的甲烷达到爆炸范围后,极易引发爆炸。图3为4.7m/s风速下小孔破裂模拟超压核算结果,表8给出了不同半径下爆炸超压半径。

5 结论

(1)表6、表7和表8数据表明,在高压燃气管线

表5 高、次高压管道泄漏爆炸导致群死群伤的基础数据表

管道性质	泄漏孔径	失效频率	点火概率	人口密集区出现的概率	频率 $R(x, y)$
高压 (DN800)	小孔	1.9×10^{-2}	0.2	0.0093	3.5×10^{-6}
	中孔	6.4×10^{-2}	0.2	0.0093	1.2×10^{-5}
	大孔	6.4×10^{-3}	0.2	0.0093	1.2×10^{-6}
	破裂	3.2×10^{-3}	0.2	0.0093	6.0×10^{-7}

发生破裂时，气体扩散、火灾热辐射和爆炸冲击波三类核算结果表明：爆炸事故造成的影响范围最大；

(2) 风速对爆炸冲击波半径分布有一定影响，在同等破坏孔径下，风速越大则爆炸冲击波轻伤半径

也越大，但是影响幅度不大，说明风速不是决定性因素；

(3) 风速相同时，爆炸冲击波半径随着孔径增大而增大，且变化幅度较大，在综合考虑风速影响后表9给出建议管道泄漏的建议疏散半径；

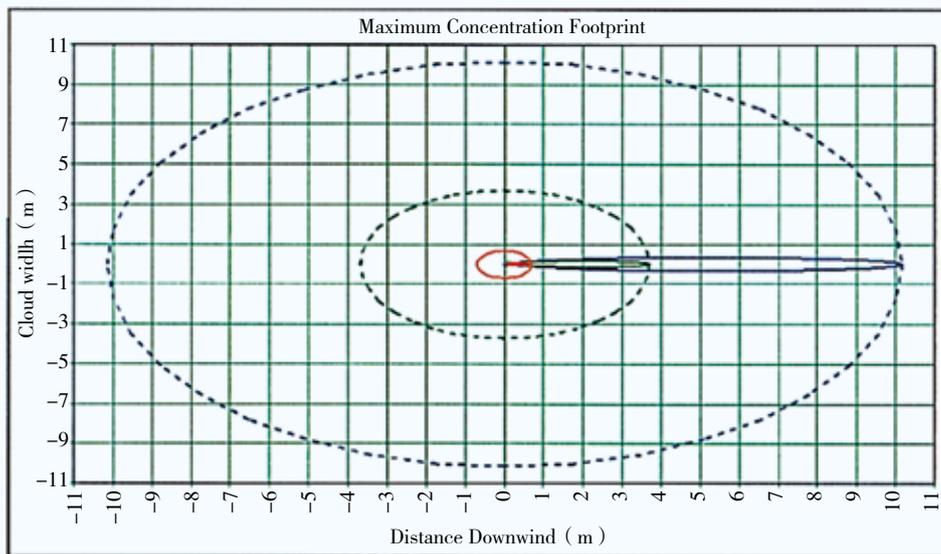


图1 风速为4.7m/s时，小孔（5mm）泄漏扩散影响范围

表6 高压燃气管网可燃气体浓度扩散分析汇总表

事故场景	气象参数 (风速 m/s)	最大影响半径/m (以泄漏点为中心)		
		UEL	LEL	0.5LEL
小孔 泄漏 (5mm)	3	0.7	3.8	9.9
	4.7	0.7	3.7	10.3
	8	0.7	3.6	10.8
	10.5	0.6	3.5	10.5
中孔 泄漏 (25mm)	3	4.7	28.9	63.2
	4.7	4.7	30.5	67.2
	8	4.8	33.6	73.6
	10.5	4.8	35.9	72.4
大孔 泄漏 (100mm)	3	24.8	120.9	190.6
	4.7	25.2	124.9	196.2
	8	26	133.0	208.4
	10.5	26.7	138.8	217.4
管道 破裂 (大于100mm)	3	69.4	233.3	312.7
	4.7	70.4	234.8	319.5
	8	72.7	240.0	326.9
	10.5	74.4	244.6	338.6

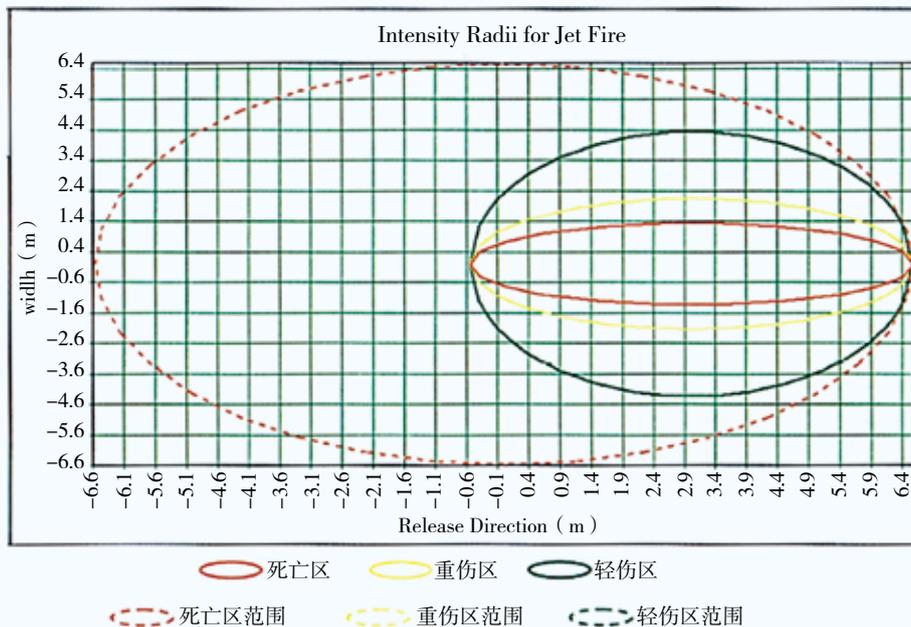


图2 风速4.7m/s时，火灾热辐射模拟结果

表7 高压燃气管道喷射火热辐射强度汇总表

事故场景	气象参数 (风速m/s)	轻伤阈值 (4.0) 影响距离	重伤阈值 (12.5) 影响距离	死亡阈值 (37.5) 影响距离
小孔泄漏 (5mm)	4.7	6.6	6.6	6.6
中孔泄漏 (25mm)	4.7	30.2	27.9	27.9
大孔泄漏 (100mm)	4.7	114	103.9	102.8
管道破裂 (>100mm)	4.7	306.4	279.4	274.4

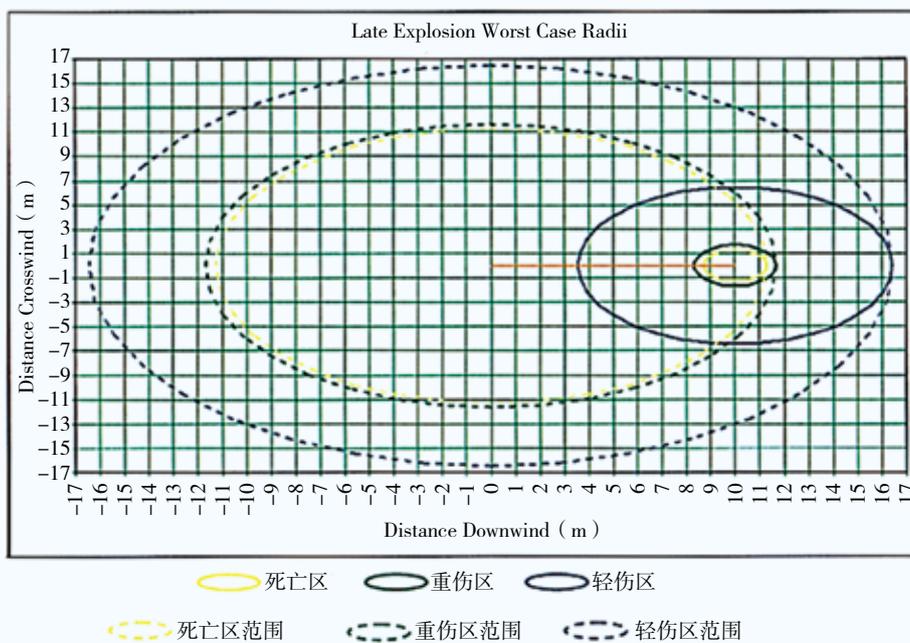


图3 风速为4.7m/s时，小孔泄漏爆炸超压模拟结果

表8 高压燃气管道爆炸超压半径汇总表

事故场景	气象参数 (风速m/s)	爆炸超压轻伤阈值 (2kPa)	爆炸超压重伤阈值 (14kPa)	爆炸超压死亡阈值 (21kPa)
小孔 泄漏 (5mm)	3	11.6	6.7	6.3
	4.7	16.4	11.7	11.3
	8	16.2	11.6	11.2
	10.5	16.0	11.6	11.2
中孔 泄漏 (25mm)	3	102.1	70.9	68.4
	4.7	107.4	76	73.5
	8	112.4	81	78.5
	10.5	112.7	81.1	78.6
大孔 泄漏 (100mm)	3	375.2	237.9	227.1
	4.7	378.8	242.6	231.8
	8	386.2	251.9	241.3
	10.5	393.1	261.4	250.9
管道破裂 (> 100mm)	3	751.7	424.3	398.5
	4.7	735.9	416.6	391.3
	8	739.8	432.4	408.1
	10.5	740.4	440.0	416.2

表9 高压燃气管道建议疏散半径

事故场景	最大杀伤 半径/m	建议疏散 半径/m
小孔 (5mm)	16.4	50
中孔 (25mm)	112.7	250
大孔 (100mm)	393.1	500
管道破裂 (> 100mm)	751.7	900

(4) 软件建立的模型与实际情况不可能完全一致, 本次核算所考虑的情况均为理想情况的最大工况, 实际生产中如果考虑覆土层厚度, 疏散半径已设置冗余量。

参考文献

- 1 谷志宇, 董绍华, 牛景弘等. 天然气管道泄漏后果影响区域的计算[J]. 油气储运, 2013; 1(32): 85-87
- 2 唐保金. 燃气管道泄漏及扩散规律研究 (硕士学位论文)[D]. 济南: 山东建筑大学, 2009: 8-19
- 3 乔伟彪, 周勇, 孙二国. 不同影响因素对高压天然气管道泄漏影响的数值研究[A]. 中国燃气运营与安全研讨会[C], 2013
- 4 刘暄亚, 许晓元, 纪超等. 城市中高压燃气管道泄漏、火灾事故风险分析[J]. 城市燃气, 2013; 01(455): 10-18

工程信息

云南能投富长支线建成通气

2018年3月13日, 云南能投发布公告, 公司全资子公司云南省天然气有限公司投资建设的富长支线(富民段)于日前正式通气。富长支线(富民段)起点位于中石油西南管道公司中缅天然气管道24#阀室, 终点位于云南省天然气有限公司富民分

输站。管道线路全长约10.88km, 设计压力10MPa。富长支线(富民段)投产后即可向富民周边的工商业、居民用户供气, 预计投产后日用气量约为9万m³/d, 预计到2020年日用气量可达30万m³/d。

(本刊通讯员供稿)