

基于 PHAST 的天然气管道泄漏后果 危害范围模拟研究*

詹文文^{1,2}, 牛 辉^{1,2}, 韦 奉^{1,2}, 刘 斌^{1,2}, 王 磊^{1,2},
赵红波^{1,2}, 席敏敏^{1,2}, 许 铎³

- (1. 中油国家石油天然气管材工程技术研究中心有限公司, 西安 710018;
2. 中国石油宝鸡石油钢管有限责任公司, 陕西 宝鸡 721008;
3. 西南石油大学 石油与天然气工程学院, 成都 610000)

摘 要: 针对天然气管道泄漏引发的事故后果, 依据相关计算理论及伤害准则, 采用 PHAST 软件对不同输送压力、泄漏孔径、环境风速、泄漏方向等因素进行分析, 确定了不同工况下室内人员及室外人员的伤亡范围。研究表明: 影响火灾爆炸事故最严重的因素是泄漏孔径, 造成人员伤亡半径的影响大小依次为: 火球>喷射火>蒸气云爆炸, 事故造成人员伤亡距离室外大于室内。根据国标相关计算公式计算某管线运行工况下的潜在影响半径略低于模拟值, 因此国标对潜在影响半径的设置略为保守, 该研究结果可为天然气扩散后果的影响因素及危害范围的研究提供参考。

关键词: 天然气管道; 喷射火; 火球; 蒸气云爆炸; PHAST

中图分类号: TE88

文献标识码: A

DOI: 10.19291/j.cnki.1001-3938.2023.12.004

PHAST-based Simulation of Hazard Range of Consequences of Natural Gas Pipeline Leakage

ZHAN Wenwen^{1,2}, NIU Hui^{1,2}, WEI Feng^{1,2}, LIU Bin^{1,2}, WANG Lei^{1,2},
ZHAO Hongbo^{1,2}, XI Minmin^{1,2}, XU Duo³

(1. Chinese National Engineering Research Center for Petroleum and Natural Gas Tubular Goods Co., Ltd., Xi'an 710018, China; 2. CNPC Baoji Petroleum Steel Pipe Co., Ltd., Baoji 721008, Shaanxi, China; 3. School of Petroleum and Natural Gas Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610000, China)

Abstract: In order to solve the problems of accidents caused by natural gas pipeline leak, based on relevant calculation theories and injury criteria, PHAST software was used to analyze factors such as different transmission pressures, leak aperture, ambient wind speed, and leak direction, and determine the range of casualties for indoor and outdoor personnel under different working conditions. Research has shown that the most serious factor affecting fire and explosion accidents is the leakage bore diameter, and the impact size on the radius of casualties is fireball>jet fire>vapor cloud explosion, and the distance of casualties caused by accidents is greater outdoors than indoors. According to the national relevant calculation formulas, the potential impact radius of a certain pipeline under operating conditions is slightly lower than the simulated value. Therefore, the setting of the potential impact radius in the national standard is slightly conservative. The research results can provide reference for the study of the influencing factors and hazard range of natural gas dispersion.

Key words: natural gas pipeline; jet fire; fireball; vapour cloud explosion; PHAST

*基金项目: 中国石油天然气集团有限公司前瞻性基础性及战略性技术攻关课题“中长距离管道纯氢/掺氢输送关键技术研究”(项目编号 2021DJ5002 (JT))。

0 前言

管道输送作为长距离油气输送的主要方式之一，具有运输量大、运输距离远、运输成本低等优点。截至2020年底，我国境内已建成天然气管道约 8.6×10^4 km，并且一半以上运行时间已经超过20年，管道爆炸着火、断裂、泄漏事故时有发生^[1-2]。当输气管道发生泄漏后，若在扩散范围内存在点火源，很可能引发火灾和爆炸等更严重的后果，造成巨大损失，为此许多学者做了大量研究。HANIFI^[3]采用ALOHA软件估算风险，得出天然气管道泄漏最严重的后果是喷射火焰的热辐射效应；江世超^[4]计算了喷射火、火球和蒸气云爆炸三种事故的影响范围；耿晓茹^[5]通过试验和数值模拟分析了障碍物对喷射火的影响；CHI等^[6]研究了不同建筑布局对蒸气云爆炸超压传播规律的影响；鲍庆军^[7]使用FLACS模拟空旷区和人口密集区输气管道泄漏

扩散、燃烧和爆炸事故的影响；杨克等^[8]采用理论公式对蒸气云爆炸的破坏范围进行定量分析，发现随着泄漏时间增加，死亡半径和财产损失半径明显增大。

目前，输气管道泄漏后发生火灾及爆炸的研究主要采用经验模型和数值模拟方法进行，研究对象多为低压小直径管道，但高压大直径管道往往造成危害范围更大。因此本研究将采用PHAST软件对国内西南某高压大直径输气管道泄漏后发生火灾和爆炸的原因进行分析，并计算其对人员的影响范围。

1 输气管道失效后果理论分析

1.1 失效后果类型和伤害形式

发生泄漏的高压输气管道管径为1 016 mm，输送压力为10 MPa，采用事件树分析方法，对管道失效情境、后果及影响形式进行分析，如图1所示。

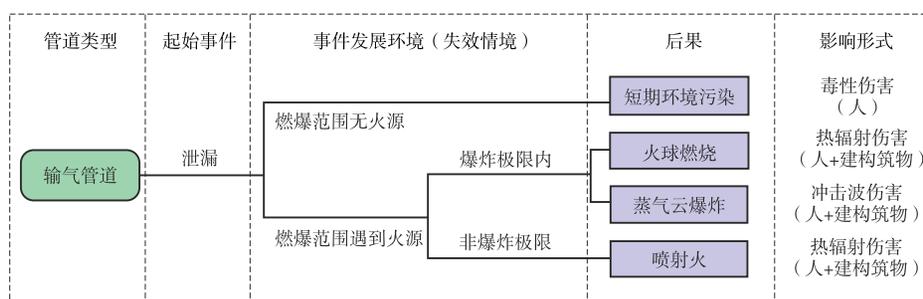


图1 某管道失效事件树分析图

通过对该管道输送气体进行分析，其组分中几乎不含 H_2S ，因此在失效后果分析中不考虑毒性伤害，因而天然气管道失效后果主要模式有火球、喷射火、蒸气云爆炸。有研究^[9]表明，输气管道失效形式发生的概率不同，最终的后果也不同，其中喷射火发生概率为0.15，火球发生概率为0.15，蒸气云爆炸发生概率为0.56。

1.2 事故后果计算模型

1.2.1 喷射火后果计算模型

目前对喷射火后果计算主要有点源模型和固体火焰模型，根据美国石油研究院的模型^[10]，假定火焰为圆锥形，采用从泄漏处到火焰长度4/5处的点源模型来表示，喷射火火焰长度和点源的热辐射通量计算为

$$L = \frac{(H_c m)^{0.444}}{161.66} \quad (1)$$

$$q = \frac{\eta Q_0 H_c}{4\pi x^2} \quad (2)$$

式中： L ——火焰长度，m；

H_c ——燃烧热，J/kg；

m ——质量流速，kg/s；

q ——点源的热通量，W/m²；

η ——效率因子，可取0.35；

x ——距火源的距离，m；

Q_0 ——质量流速，kg/s。

1.2.2 火球后果计算模型

火球后果计算一般采用Greenberg-Cramer模型^[11]，火球直径和持续时间计算分别为

$$D = 5.33W^{0.327} \quad (3)$$

$$t = 1.089W^{0.327} \quad (4)$$

式中： D ——火球直径，m；

t ——火球持续时间，s；

W ——火球中损耗的可燃物的质量，kg。

1.2.3 蒸气云爆炸后果计算模型

蒸气云爆炸采用TNT当量法对爆炸能量进行等量计算^[12]，即

$$W_{TNT} = \frac{AW_fQ_f}{Q_{TNT}} \quad (5)$$

式中： W_{TNT} ——蒸气云的TNT当量，kg；

A ——蒸气云的当量系数，取4%；

W_f ——蒸气云中燃料的总质量，kg；

Q_f ——燃料的燃烧热，MJ/kg；

Q_{TNT} ——TNT的爆炸热，通常为4.12~4.69 MJ/kg，本研究取4.52 MJ/kg。

2 火灾及爆炸伤害准则

输气管道泄漏事故主要伤害形式有热辐射伤害和冲击波伤害。火球、喷射火、蒸气云爆炸均会造成热辐射伤害，而蒸气云爆炸主要造成冲击波伤害，热辐射影响较小，通常可以忽略。伤害程度可根据伤害准则来评估，可接受的最大伤害程度所对应的半径则为伤害半径。

2.1 热辐射伤害准则

当发生热辐射伤害时，人员若处在不同环境，其伤害效果也不相同。根据DNV等文献^[13-14]，将火灾人员类型分为室内人员和室外人员，并假设建筑物若未起火，室内人员视为安全状态。其伤害准则见表1。

表1 不同环境下热辐射对人员的伤害效应

人员类型	热辐射通量/(kW·m ⁻²)	伤害效应
室外人员	35	100%死亡
	6	死亡临界值
	1.5	人员密集区允许最大热通量
室内人员	≥40	100%死亡(建筑物起火)
	25~40	若人员逃离建筑物,死亡率同室外人员
	<25	死亡率为0(人员受到保护)

2.2 冲击波伤害准则

调研相关文献^[15]，国外对爆炸冲击波阈值标准与国内不同，其对室外人员和室内人员的伤害效应不同，具体见表2。

表2 不同环境下冲击波对人员的伤害效应

人员类型	爆炸超压/MPa	伤害效应
室外人员	0.030	高致死阈值
	0.014	死亡临界值
	0.007	不可逆效应阈值
	0.003	可逆效应阈值
室内人员	≥0.030	100%死亡(建筑物完全破坏)
	≤0.005	死亡临界值(人员受到保护)

3 典型事故后果模拟

PHAST软件是风险定量分析的多功能计算软件，由挪威船级社DNV公司开发，适合应急计划制订者和安全管理人员使用^[16]，故本研究采用PHAST软件进行相关模拟计算。

3.1 模拟参数确定

对该泄漏输气管线基本运行情况和沿线环境情况进行调研，选取具有代表性数值计算分析，具体选值见表3。

表3 某输气管道模拟参数

管径/mm	输送压力/MPa	气质情况	管道长度/km	泄漏模式*	气象条件	地形地貌
1 016	①10; ②9; ③8; ④7; ⑤6。	95%CH ₄ + 5%C ₂ H ₆	16	①小孔/裂纹(d/D=0.1); ②小孔/裂纹(d/D=0.2); ③大孔(d/D=0.5); ④大孔(d/D=0.7); ⑤管道完全破裂。	①风速1 m/s,大气稳定度F; ②风速3 m/s,大气稳定度E; ③风速5 m/s,大气稳定度D; ④风速7 m/s,大气稳定度D; ⑤风速9 m/s,大气稳定度C。	平原,周围不存在障碍物

注：* d 为泄漏孔径， D 为管道直径。

3.2 喷射火事故后果分析

天然气管道泄漏后发生喷射火事故，其产生

的热辐射伤害巨大。假定天然气管道连续泄漏30 min后喷射火事故发生，探究不同输送压力、

泄漏孔径、环境风速及泄漏方向对事故后果影响。

3.2.1 输送压力

选择管道长度 16 km，管径 1 016 mm，小孔/裂纹 ($d/D=0.2$)，与水平面呈 45° 方向上泄漏，风速 5 m/s，大气稳定度为 D，分析 10 MPa、9 MPa、8 MPa、7 MPa、6 MPa 五种输送压力下管道泄漏喷射火的影响。输送压力 10 MPa 的热辐射危害范围如图 2 所示，不同输送压力下热辐射伤害距离对比如图 3 所示。

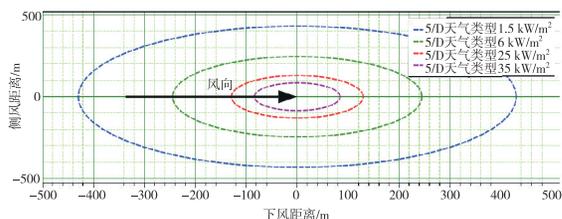


图 2 10 MPa 输送压力管道泄漏喷射火的热辐射危害范围

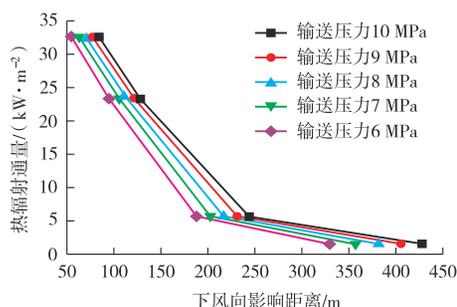


图 3 不同输送压力管道泄漏喷射火热辐射伤害距离对比

从图 3 可以看出，随着输送压力增大，其热辐射伤害距离增大，且增加的幅值相差不大。当输送压力 10 MPa 时，产生热辐射伤害距离最大，热辐射通量阈值 1.5 kW/m^2 时伤害距离为 1 598 m，室外人员死亡距离为 397 m，室内人员死亡距离为 388 m。

3.2.2 泄漏孔径

选择管道长度 16 km，管径 1 016 mm，输送压力 10 MPa，与水平面呈 45° 方向上泄漏，风速 5 m/s，大气稳定度为 D，分析泄漏孔径/管道直径 (d/D) 为 0.1、0.2、0.5、0.7、1.0 五种泄漏模式下喷射火的影响。 $d/D=1.0$ 泄漏模式下喷射火的热辐射危害范围如图 4 所示，不同泄漏模式下喷射火的热辐射伤害距离对比如图 5 所示。

从图 5 可以看出，随着泄漏孔径增大，其热辐射伤害距离增大，而大孔和断裂泄漏明显比小

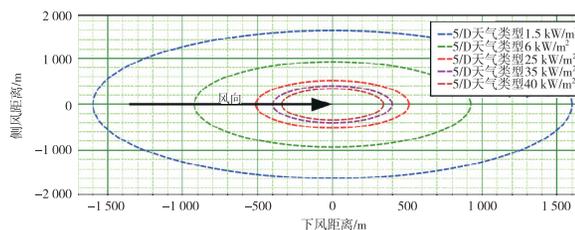


图 4 $d/D=1.0$ 泄漏模式下的喷射火热辐射危害范围

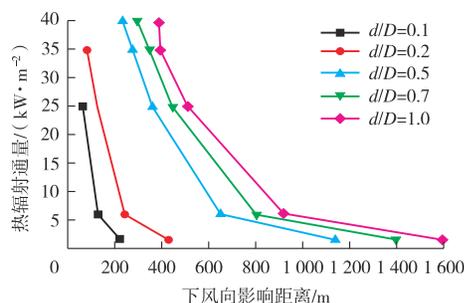


图 5 不同泄漏模式下喷射火的热辐射伤害距离对比

孔泄漏造成的伤害范围更大。当 $d/D=1.0$ 时，即完全断裂时产生热辐射伤害距离最大，热辐射通量阈值 1.5 kW/m^2 时伤害距离为 1 598 m，室外人员死亡距离为 397 m，室内人员死亡距离为 388 m。

3.2.3 环境风速

选择管道长度 16 km，管径 1 016 mm，小孔/裂纹 ($d/D=0.2$)，输送压力 10 MPa，与水平面呈 45° 方向上泄漏，分析五种气象条件下喷射火的影响。风速为 1 m/s、大气稳定度为 F 条件下喷射火的热辐射危害范围如图 6 所示，不同环境风速下热辐射伤害距离对比如图 7 所示。

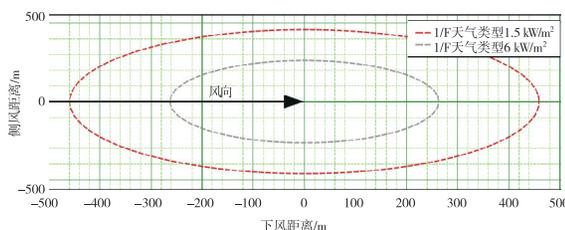


图 6 风速 1 m/s、大气稳定度为 F 条件下喷射火的热辐射危害范围

从图 7 可以看出，环境风速与热辐射伤害距离并非线性关系。当环境风速 1 m/s、热辐射通量阈值 1.5 kW/m^2 时对应范围最大，距离为 458 m；当环境风速为 9 m/s 时，造成人员伤亡最严重，室外人员死亡距离为 109 m，室内人员死亡距离为 95 m。

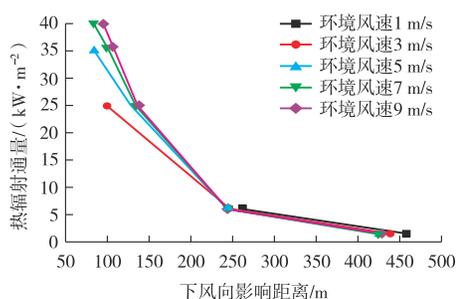


图7 不同环境风速下喷射火的热辐射伤害距离对比

3.2.4 泄漏方向

选择管道长度 16 km，管径 1 016 mm，小孔/裂纹 ($d/D=0.2$)，输送压力 10 MPa，风速 5 m/s，大气稳定度为 D，分析与水平面呈 45° 方向、 0° 方向、 30° 方向、 60° 方向、 90° 五种泄漏方向喷射火影响范围，其中与水平面呈 0° 方向的热辐射危害范围如图 8 所示，不同泄漏方向热辐射伤害距离对比如图 9 所示。

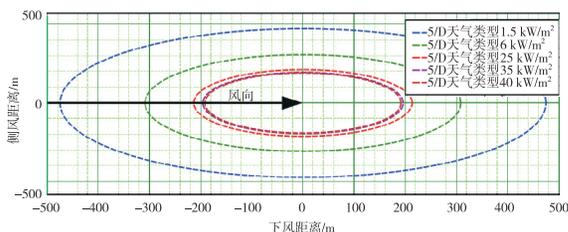


图8 0° 方向的热辐射危害范围

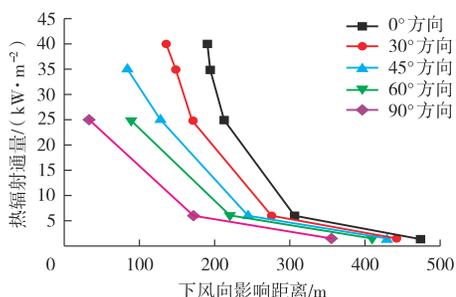


图9 不同泄漏方向喷射火的热辐射伤害距离对比

从图 9 可以看出，随着泄漏方向从垂直向水平过渡，其热辐射伤害距离增大，这是因为泄漏方向与风向一致，加大了气体扩散距离，当气体水平扩散时，产生热辐射伤害距离最大。热辐射通量阈值 1.5 kW/m^2 时伤害距离为 473 m，室外人员死亡距离为 195 m，室内人员死亡距离为 191 m。

3.3 蒸气云爆炸事故后果分析

天然气管道泄漏后发生蒸气云爆炸事故概率最大，其产生的冲击波伤害较严重。假定天然气管道连续泄漏 30 min 时蒸气云爆炸事故发生，探

究不同的输送压力、泄漏孔径、环境风速、泄漏方向对事故后果影响。

3.3.1 输送压力

选择管道长度 16 km，管径 1 016 mm，小孔/裂纹 ($d/D=0.2$)，与水平面呈 45° 方向上泄漏，风速 5 m/s，大气稳定度为 D。分析 10 MPa、9 MPa、8 MPa、7 MPa、6 MPa 五种输送压力下蒸气云爆炸影响。其中 10 MPa 输送压力管道蒸气云的冲击波危害范围如图 10 所示，不同输送压力冲击波伤害距离对比如图 11 所示。

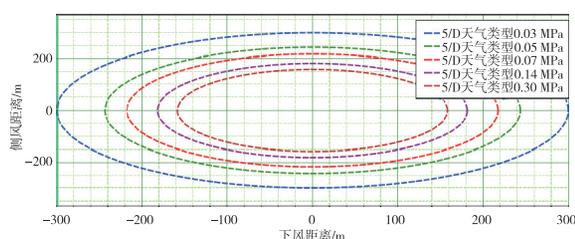


图10 10 MPa 输送压力管道蒸气云冲击波危害范围

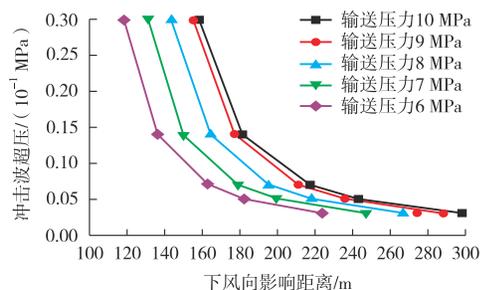


图11 不同输送压力管道蒸气云冲击波伤害距离对比

从图 11 可以看出，随着输送压力增大，其冲击波超压伤害距离增大，且增加的幅值相差不大。当输送压力 10 MPa 时，产生冲击波超压伤害距离最大，超压阈值 0.003 MPa 时伤害距离为 299 m，室外人员死亡临界值距离为 181 m，室内人员死亡距离为 158 m。

3.3.2 泄漏孔径

选择管道长度 16 km，管径 1 016 mm，输送压力 10 MPa，与水平面呈 45° 方向泄漏，风速 5 m/s，大气稳定度为 D，分析泄漏孔径/管道直径 (d/D) 为 0.1、0.2、0.5、0.7、1.0 五种泄漏模式下蒸气云冲击波的影响。其中， $d/D=1.0$ 泄漏模式下蒸气云冲击波危害范围如图 12 所示，不同泄漏孔径冲击波伤害距离对比如图 13 所示。

从图 13 可以看出，随着泄漏孔径增大，其冲击波超压伤害距离增大，发生大孔和断裂明显

比小孔泄漏造成的范围大。当 $d/D=1.0$ 时，即完全断裂产生冲击波超压伤害距离最大，超压阈值 0.003 MPa 时伤害距离为 1269 m ，室外人员死亡临界距离为 783 m ，室内人员死亡距离为 686 m 。

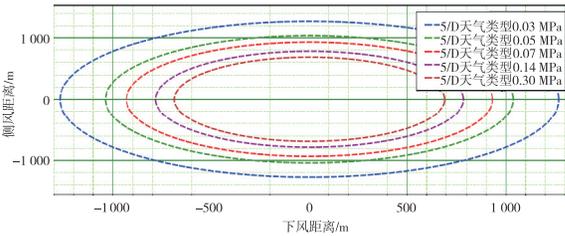


图12 $d/D=1.0$ 泄漏模式下蒸气云冲击波危害范围

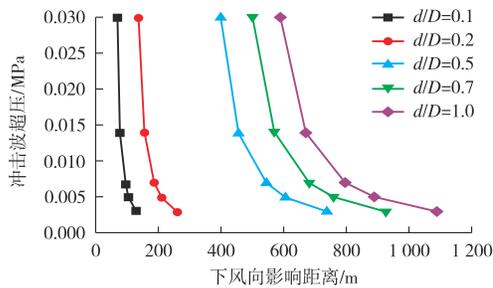


图13 不同泄漏孔径蒸气云冲击波伤害距离对比

3.3.3 环境风速

选择管道长度 16 km ，管径 1016 mm ，小孔/裂纹($d/D=0.2$)，输送压力 10 MPa ，与水平面呈 45° 方向上泄漏，分析表3所示五种气象条件下蒸气云爆炸的影响。其中，风速 1 m/s 、大气稳定度为F条件下的冲击波危害范围如图14所示，不同环境风速冲击波伤害距离对比如图15所示。

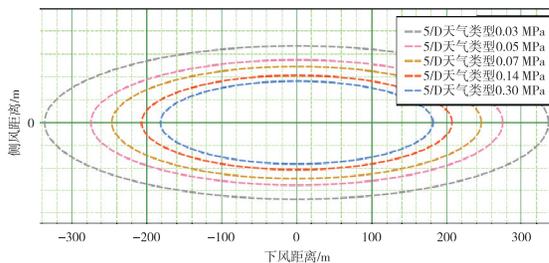


图14 风速 1 m/s 的冲击波危害范围

从图15可以看出，随着环境风速增大，其冲击波超压伤害距离减小，因为风速将爆炸浓度稀释，当环境风速为 1 m/s 时产生冲击波超压伤害距离最大，超压阈值 0.003 MPa 时伤害距离为 336 m ，室外人员死亡临界值距离为 200 m ，室内人员死亡距离为 174 m 。

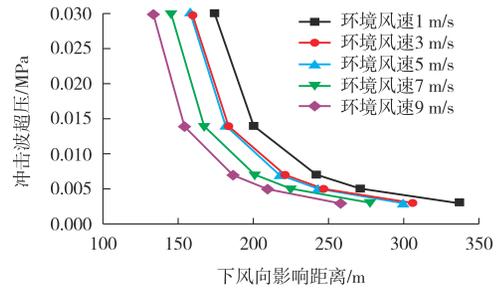


图15 不同环境风速冲击波伤害距离对比

3.3.4 泄漏方向

选择管道长度 16 km ，管径 1016 mm ，小孔/裂纹($d/D=0.2$)，输送压力 10 MPa ，风速 5 m/s ，大气稳定度为D，分析与水平面呈 45° 方向、 0° 方向、 30° 方向、 60° 方向、 90° 五种泄漏方向蒸气云爆炸的影响。其中，与水平面呈 0° 方向的冲击波危害范围如图16所示，不同泄漏方向冲击波伤害距离对比如图17所示。

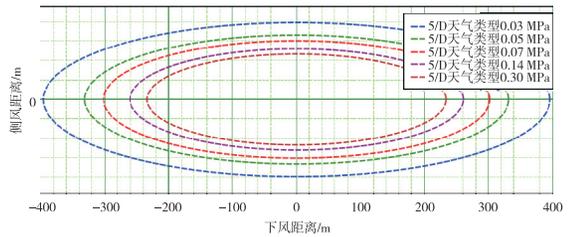


图16 0° 方向的冲击波危害范围

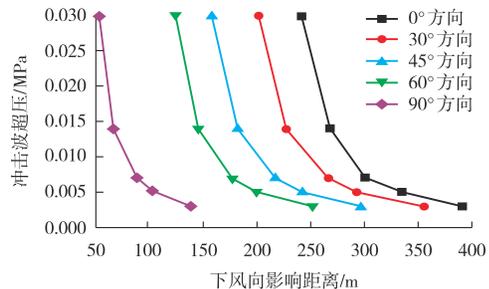


图17 不同泄漏方向冲击波伤害距离对比

从图17可以看出，随着泄漏方向从垂直向水平过渡，冲击波超压伤害距离将增大，而水平泄漏时产生冲击波超压伤害明显比其他泄漏方向距离大，超压阈值 0.003 MPa 时伤害距离为 393 m ，室外人员死亡临界距离为 268 m ，室内人员死亡距离为 241 m 。

3.4 火球事故后果分析

火球是可燃性气体与空气的混合云团，是可燃范围内遇到点火源发生的瞬态燃烧，一般发生概率相对较低，通常火球产生的瞬时热量以热剂

量来表征, PHAST软件以人体所能承受的热量为依据, 设定2.144 54%和4.289 08%浓度边界作为人员安全和死亡的阈值。当管道长度16 km、管径1 016 mm、输送压力10 MPa、风速5m/s、小孔/裂纹($d/D=0.2$)、水平方向泄漏, 火球产生危害范围如图18所示, 并计算不同工况下火球影响范围见表4。

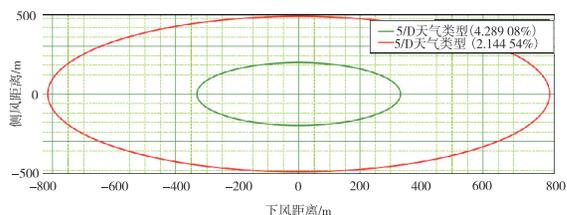


图18 火球事故危害范围

表4 不同工况下火球事故影响范围

工况	影响范围/m		
	2.144 54%	4.289 08%	
输送压力	10 MPa	816	331
	9 MPa	764	306
	8 MPa	710	283
	7 MPa	651	258
	6 MPa	589	232
泄漏孔径(d/D)	0.1	373	145
	0.2	823	331
	0.5	2 344	1 012
	0.7	2 739	1 222
	1.0	2 838	1 257
环境风速	1 m/s	660	307
	3 m/s	743	325
	7 m/s	868	346
	9 m/s	870	368

通过模拟计算, 当管道输送压力、泄漏孔径、环境风速增大, 发生火球的上下限浓度边界将增大。当发生大孔泄漏和断裂泄漏时, 火球的上下限浓度边界远远大于小孔泄漏。输送压力10 MPa、风速5 m/s、小孔/裂纹($d/D=0.2$)、水平方向泄漏上限浓度边界为331 m, 大于相同工况下喷射火和蒸气云爆炸人员死亡半径307 m和268 m。一旦在燃爆浓度范围内遇到点火源, 火球事故将造成更大的伤害。

3.5 事故后果对比分析

根据《油气输送管道完整性管理规范》

(GB 32167—2015)中6.1.3.2相关计算公式, 计算某管线运行工况下潜在影响半径, 其中管径1 016 mm管道在10 MPa运行压力下其潜在影响半径为318 m, 但是标准给定的潜在影响半径并未说明其代表死亡半径还是轻伤半径。根据火灾及爆炸伤害准则, 喷射火事故产生的热辐射通量6 kW/m²和蒸气云爆炸产生的冲击波超压0.014 MPa是室外人员致死阈值, 结合PHAST软件模拟结果确定室外人员致死范围, 对比不同失效后果在不同工况条件下致死情况, 结果见表5。

表5 不同事故后果对室外人员致死范围

工况	室外人员致死范围/m		
	喷射火	蒸气云爆炸	
输送压力	10 MPa	244	181
	9 MPa	231	177
	8 MPa	217	164
	7 MPa	203	150
	6 MPa	188	136
泄漏孔径(d/D)	0.1	128	91
	0.5	654	531
	0.7	806	665
	1.0	922	783
环境风速	1 m/s	262	200
	3 m/s	247	183
	7 m/s	243	167
	9 m/s	244	154
	泄漏方向	0°	307
30°		276	227
60°		220	145
90°		172	66

通过模拟计算火球造成的伤害半径最大, 蒸气云爆炸最小。当发生小孔垂直泄漏时, 造成的人员伤亡最低。对比火球最大伤亡半径和潜在影响半径发现, 当输送压力10 MPa、风速5 m/s、小孔/裂纹($d/D=0.2$)、水平方向泄漏, 其死亡半径大于潜在影响半径, 并且随着泄漏孔径和环境风速增大, 死亡半径更大, 因此GB 32167—2015中潜在影响半径设置略为保守。

4 结 论

(1) 采用PHAST软件对喷射火、火球、蒸

气云爆炸等事故后果进行数值模拟, 计算了不同工况下室内及室外人员的伤亡范围。

(2) 影响火灾爆炸事故最严重的因素是泄漏孔径, 通过计算可知造成人员伤亡半径的影响大小: 火球>喷射火>蒸气云爆炸。

(3) 根据GB 32167—2015计算某管线运行工况下的潜在影响半径, 管径1 016 mm在10 MPa运行压力下其潜在影响半径为318 m, 危害范围略低于模拟值, 因此GB 32167—2015中潜在影响半径设置略为保守。

(4) 火灾爆炸事故中造成人员伤亡距离室外大于室内。通过对泄漏事故影响范围研究, 重点从杜绝点火源、减少泄漏量、人员疏散等方面减轻事故后果。

参考文献:

- [1] 高鹏, 高振宇, 赵赏鑫, 等. 2020年中国油气管道建设新进展[J]. 国际石油经济, 2021, 29(3): 53-60.
- [2] 赵向东. 某油田天然气输送管线泄漏原因分析[J]. 焊管, 2020, 43(7): 25-29.
- [3] HANIFI S M. Risk calculation and consequences simulation of natural gas leakage accident using ALOHA software[J]. JHSW, 2019, 9(1): 13-20.
- [4] 江世超. 天然气管道泄漏量计算方法及事故后果研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2017.
- [5] 耿晓茹. 障碍物对天然气管道喷射火影响的实验及数值模拟研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2018.
- [6] CHI M, JIANG H. Study on overpressure propagation law of

vapor cloud explosion under different building layouts [J]. ACS Publications, 2021, 17(2): 25-33.

- [7] 鲍庆军. 输气管道灾害情景构建与事故后果分析[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2018.
- [8] 杨克, 王壮, 贺雷, 等. 天然气管道蒸汽云爆炸事故定量计算及风险评估[J]. 工业安全与环保, 2019, 45(11): 31-35.
- [9] VIANELLO C, MASCHIO G. Quantitative risk assessment of the Italian gas distribution network[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2014, 32(7): 5-17.
- [10] 吴宗之, 任常兴. 危险品道路运输事故风险评价方法[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014: 104-125.
- [11] 胡波. 火灾、爆炸及中毒事故后果数值模拟[D]. 赣州: 江西理工大学, 2008.
- [12] 郑津洋, 马夏康, 尹谢平. 长输管道安全[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [13] RUSSO P, PARISI F. Risk-targeted safety distance of reinforced concrete buildings from natural-gas transmission pipelines [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2015(148): 57-66.
- [14] OGP. Risk assessment data directory-vulnerability of plant structure: Report No.434-15[R]. [S.l.]: OGP, 2010.
- [15] 师立晨, 多英全. 重大事故危害阈值的探讨[J]. 中国安全科学学报, 2009, 19(12): 51-56, 205.
- [16] 赵博鑫, 朱明, 彭莹, 等. 基于PHAST软件模拟氢气/天然气管道泄漏[J]. 石化技术, 2017, 24(5): 48-50.

作者简介: 詹文文(1996—), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事油气管道生产、设计及安全运营等方面的研究。

收稿日期: 2023-02-21

修改返回日期: 2023-10-12

编辑: 黄蔚莉

(上接第13页)

参考文献:

- [1] 隋永莉, 吴宏. 我国长输油气管道自动焊技术应用现状及展望[J]. 油气储运, 2014, 33(9): 913-921.
- [2] 胡胜, 罗雨, 焦向东, 等. 轨道式管道焊接机器人焊缝跟踪方法研究现状[J]. 河北科技大学学报, 2015, 36(2): 126-133.
- [3] 陈华斌, 黄红雨, 林涛, 等. 机器人焊接智能化技术与研究现状[J]. 电焊机, 2013, 43(4): 8-9.
- [4] 陈华斌, 孔萌, 吕娜, 等. 视觉传感技术在机器人智能化焊接中的研究现状[J]. 电焊机, 2017, 47(3): 1-7.
- [5] 张毅, 刘晓文, 张锋, 等. 管道自动焊装备发展现状及前景展望[J]. 油气储运, 2019, 38(7): 721-727
- [6] 贾宗彪. P-GMAW电弧传感焊缝跟踪精度研究[D]. 天津: 天

津工业大学, 2021.

- [7] 曹志飞. P-GMAW全位置管道自动焊接系统研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2022.
- [8] 隋永莉. 新一代大输量管道建设环焊缝自动焊工艺研究与技术进展[J]. 焊管, 2019, 41(7): 83-89.
- [9] 罗璐. 基于激光视觉的不锈钢GTAW焊缝成形控制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2009.
- [10] 解晓童. 基于主被动视觉传感的机器人焊接过程焊缝跟踪与熔池监测研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2020.

作者简介: 闫洁(1988—), 女, 学士, 工程师, 主要从事长输管道施工装备的研究工作。

收稿日期: 2023-08-17

编辑: 罗刚