

高压天然气管道泄漏燃烧爆炸后果

冯文兴¹ 项小强¹ 闫啸² 李保吉¹ 王兆芹¹

(1. 中国石油管道科技研究中心; 2. 中国石油管道分公司质量安全环保处)

冯文兴等. 高压天然气管道泄漏燃烧爆炸后果. 油气储运, 2010, 29(12): 903-904, 928.

摘要: 针对高压天然气管道的泄漏问题, 分析了喷射火、火球和蒸气云爆炸 3 种危害模式及其死亡半径。按照大孔泄漏导致 50% 人员致死率的损伤标准, 对三者的死亡半径进行了分析。结果表明: 相同情况下, 火球和喷射火的死亡半径比蒸气云爆炸的死亡半径大得多; 火球和喷射火的死亡半径较为相近。高压天然气管道泄漏发生喷射火的概率较大, 建议在进行天然气管道风险评价时重点考虑喷射火的危害。

关键词: 天然气管道; 泄漏; 喷射火; 火球; 蒸气云爆炸; 死亡半径

高压天然气管道泄漏危害后果的确定是风险评价的基础, 国内外对确定天然气管道泄漏危害区域的研究较多。多数研究者认为: 管道失效泄漏的主要危害形式是喷射火、火球、蒸气云爆炸^[1-3]。这些研究涉及了泄漏危害相应后果的伤害半径的计算, 但没有进行后果的比较分析。在风险评价的应用中, 需要针对各种危害形式作出相应后果大小的工程判断。以下通过研究喷射火、火球、蒸气云爆炸的死亡半径, 分析得出危害较大的后果模式。

1 研究对象

管道内泄漏的易燃、易爆气体可能产生各种不同的失效后果。发生泄漏时, 根据点燃时间、阻止泄漏等因素可将危害形式分为喷射火、火球、蒸气云爆炸和安全扩散。据统计, 大孔泄漏在管道事故中占有较大的比例(29%)^[2], 而且后果严重, 因此选择大孔泄漏作为研究对象。

2 计算模型

2.1 伤害准则

喷射火和火球的伤害形式为热辐射, 而蒸气云爆炸的伤害形式为冲击波。热辐射的伤害准则有热通量准则、热剂量准则和热通量-时间准则。冲击波的伤害准则有超压准则、冲量准则、超压-冲量准

则。对于喷射火的热辐射伤害, 假定其为稳定火灾, 则采用热通量准则; 对于火球的热辐射伤害, 假定其为瞬时火灾, 则采用热通量-时间准则; 对于蒸气云爆炸, 可采用超压-冲量准则。由于热辐射和冲击波的伤害机理不一致, 难以直接进行比较, 为了方便, 采用 50% 致死率作为统一基准。

2.2 伤害半径的计算

2.2.1 喷射火

喷射火的热辐射计算公式^[4]:

$$I = \frac{\alpha QHT}{4\pi \left[r_1^2 + \left(\frac{r_2}{2} \right)^2 \right]}$$

式中: α 为热辐射效率因数; Q 为泄漏气体的流量, kg/s; H 为燃烧热值, kJ/kg; T 为热辐射率因数; r_1 为到失效点的距离, m; r_2 为火焰尺寸, m。

依据文献[5]的相关规定, 暴露时间为 30 s 时, 喷射火热辐射导致人员 50% 致死率对应的热辐射通量为 25.24 kW/m²。

2.2.2 火球

火球的热辐射计算公式^[6]:

$$I = \tau EF = c(dp_w)^{-0.09} \frac{ErR^2}{(R^2 + r^2)^{3/2}}$$

式中: I 为对象遭受的热辐射强度, kW/m²; τ 为大气透射率; E 为火球表面热辐射通量, kW/m²; F 为火球的几何视角因数; c 取 2.02(N/m)^{-0.09}; p_w 为环境温度 T_a 下水的分压力, Pa; d 为对象到火球的距

作者简介: 冯文兴, 工程师, 1979 年生, 2007 年博士毕业于中国科学技术大学安全技术及工程专业, 现主要从事油气管道完整性管理与风险评价技术的研究工作。电话: 0316-2174120。E-mail: wxfeng@petrochina.com.cn

完整性 904

离, m ; E 为火球表面热辐射通量, kW/m^2 ; r 为火球中心地面投影与目标的距离, m ; R 为火球半径, m 。计算中, 参与火球燃烧的气云质量比例取 90% [7]。火球导致人员 50% 致死率对应的热辐射强度计算公式 [8]:

$$P_r = -37.23 + 2.56 \ln(t I^{4/3})$$

式中: I 为人体接受的热通量, kW/m^2 ; t 为火球持续时间, s ; P_r 为伤害概率单位, $P_r = 5$ 时对应的人员致死率是 50%。

2.2.3 蒸气云爆炸

蒸气云爆炸产生冲击波, 根据 TNT 当量法, 天然气的 TNT 当量计算公式 [9]:

$$W_{TNT} = \frac{\alpha WH}{H_{TNT}}$$

冲击波导致人员 50% 致死率的死亡半径计算公式:

$$R_{0.5} = 13.16(W_{TNT} \times 10^{-3})^{0.37}$$

式中: H_{TNT} 为 TNT 的爆炸热, J/kg ; W_{TNT} 为天然气的 TNT 当量, kg ; W 为蒸气云中可燃气体的质量, kg ; H 为天然气的燃烧热值, J/kg ; α 为可燃气体蒸气云的当量因数, 根据统计资料 [10], α 取值一般为 0.02%~15.9%, 在人员致死率为 50% 的蒸气云爆炸事故中, $\alpha \leq 3\%$; 在人员致死率为 60% 的蒸气云爆炸事故中, $\alpha \leq 4\%$; 在人员致死率为 97% 的蒸气云爆炸事故中, $\alpha \leq 10\%$ 。本研究 α 取平均值 4%。

2.2.4 泄漏量计算模型

采用大孔模型计算泄漏量, 该模型认为泄漏孔径较大时, 管道内压力受泄漏的影响降低, 同时由于管内摩擦, 管道泄漏率也由此降低。因而采用大孔模型, 结合孔口泄漏和管流状态, 进行孔口泄漏率的计算 [11]。

3 结果分析

假设: 输气管道长 20 km, 管径 1 219 mm, 压力 12 MPa, 粗糙度 46 μm , 管内天然气中 CH_4 含量 94.72%, 温度 15 $^{\circ}C$, 摩尔质量 17.1 g/mol。管道失效位置距管道起点等效长度 10 km。

3.1 不同压力时的死亡半径

管道泄漏孔径 d 为 610 mm, 压力分别为 10 MPa 和 12 MPa, 由 3 种危害造成的死亡半径(图 1)可知:

(1) 喷射火、火球的死亡半径比蒸气云爆炸的死

亡半径明显增大, 原因有两个: 一是处于开放爆炸空间的蒸气云内部的压力小; 二是参与蒸气云爆炸的天然气比例小, 只有约 4%, 而参与喷射火的天然气比例约为 100%, 参与火球燃烧的天然气比例超过 90%。

(2) 随压力的增大, 3 种危害的死亡半径增大。对于喷射火, 压力增大使得喷射火的速度、火焰长度等增大, 火焰的影响半径扩大; 对于火球, 压力增大使得泄漏量大幅增加, 因此死亡半径扩大; 对于蒸气云爆炸, 压力增大并不能使参与蒸气云爆炸的天然气的质量大幅增加, 因而死亡半径增大幅度较小。

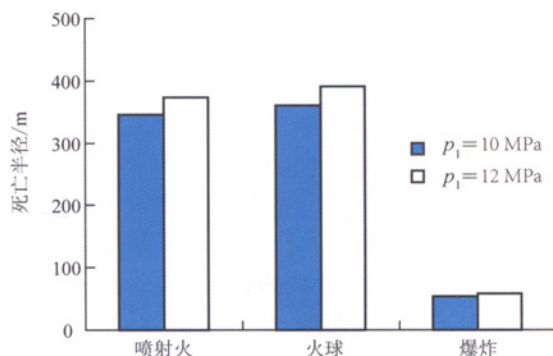


图1 不同压力时3种灾害的死亡半径

3.2 不同泄漏孔径时的死亡半径

管道压力分别为 10 MPa 和 12 MPa, 泄漏孔径不同 ($d/D = 0.2, 0.5, 1$) 时, 由 3 种危害造成的死亡半径(图 2)可知:

(1) 火球、蒸气云爆炸的死亡半径随泄漏孔径的增大而增加。泄漏孔径增大, 则泄漏的天然气总质量增加, 参与火球和蒸气云爆炸的天然气的质量随之增多。因为参与蒸气云爆炸的天然气质量仅占泄漏天然气质量的 4%, 所以其死亡半径增长幅度较小。喷射火的死亡半径变化规律是先增后减, 这是因为泄漏孔径开始增加时, 天然气质量泄漏率增长很快, 但是喷射火的表面积增加缓慢, 使得喷射火的表面辐射率迅速增加, 造成死亡半径增大; 当泄漏孔径增大到一定程度后, 天然气质量泄漏率的增加变得平缓, 而喷射火的表面积却迅速增大, 使得喷射火的表面辐射率迅速下降, 造成死亡半径减小。

(2) 在相同泄漏孔径下, 死亡半径的大小顺序为火球、喷射火、蒸气云爆炸。

3.3 不同管径时的死亡半径

当压力为 10 MPa, $d/D = 0.5$, 管径分别为 720 mm、864 mm、914 mm、1016 mm、1219 mm 时,

(下转第 928 页)

问题讨论 928

的压力变化值, MPa。

在严密性试验期间管内水温变化对压力的影响, SNIP 标准中没有特殊说明。

参考文献:

- [1] ASME B31.8-1999 输气和配气管道系统[S]. 中国兵器工业企业管理协会, 北京北方资讯服务中心, 编译. 北京: 冶金工业出版社, 2000.
- [2] ASME B31.4-1998 液态烃和其他液体管道输送系统[S]. 中国兵器工业企业管理协会, 北京北方资讯服务中心, 编译. 北京: 冶金工业出版社, 1999.

- [3] VSN011-88 干线管道施工规范[S]. 石油天然气工业企业建设部全俄干线管道施工研究所, 译. 莫斯科: 石油天然气建设部, 1989.
- [4] SNIP III-42-80 干线管道施工和验收规范[S]. 许德全, 译. 廊坊: 中国石油天然气管道勘察设计院, 1997.
- [5] 油气田及管道建设设计专业标准化委员会. GB50369—2006 油气长输管道工程施工及验收规范[S]. 北京: 中国计划出版社出版, 2006.
- [6] 油气田及管道建设设计专业标准化委员会. GB50251—2003 输气管道工程设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社出版, 2006.

(收稿日期: 2010-03-23)

(上接第 904 页)

由 3 种危害的死亡半径(图 3)可知: 3 种危害的死亡半径大小排序依次为火球、喷射火、蒸气云爆炸。

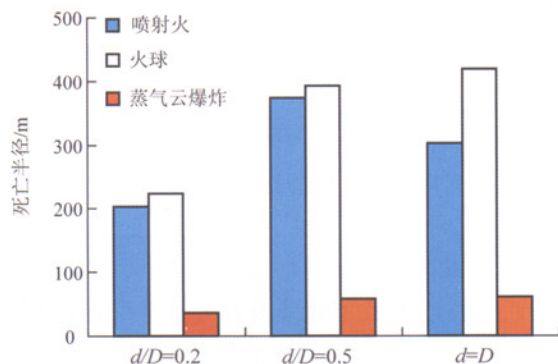


图2 不同泄漏孔径时3种灾害的死亡半径

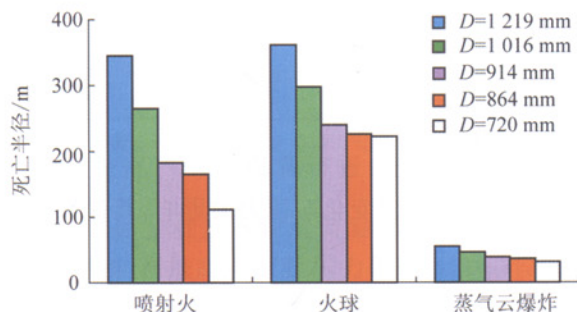


图3 不同管径时3种灾害的死亡半径

通过分析高压天然气管道泄漏后果 3 种危害形式的死亡半径可知: 相同情况下, 火球和喷射火的死亡半径比蒸气云爆炸的死亡半径大得多, 因此, 蒸气云爆炸危害在管道风险评价与后果评估时可不予重

点考虑; 火球和喷射火的死亡半径较为接近。鉴于喷射火发生概率较高, 为了降低天然气管道风险评价的难度和复杂性, 建议重点考虑喷射火的危害。

参考文献:

- [1] 秦岭, 张鹏, 陈利琼, 等. 输气管道失效 HCA 模型的确定[J]. 天然气与石油, 2007, 25(1): 7-10.
- [2] 向启贵, 熊军. 天然气输气管道环境风险评价[J]. 石油与天然气化工, 2002, 31(C00): 71-75.
- [3] 翁永基. 油气管道泄漏事故的定量风险评价[J]. 石油学报, 2004, 25(5): 108-112.
- [4] 王大庆, 高惠林, 霍春勇, 等. 天然气管道泄漏流火焰形貌研究[J]. 油气储运, 2006, 25(2): 47-49.
- [5] 任启瑞, 郭成华, 熊光德, 等. SY/T 6621—2005 输气管道系统管道完整性管理[S]. 北京: 石油工业出版社, 2005.
- [6] 胡毅廷, 饶国宁, 陈网桦, 等. 天然气输送管道泄漏事故危害定量分析[J]. 中国安全科学学报, 2003, 13(6): 21-24.
- [7] 马涛, 於孝春, 沈士明. 火球热辐射影响范围的修正计算[J]. 石油与天然气化工, 2006, 35(1): 76-78.
- [8] 宇德明, 冯长根, 曾庆轩, 等. 热辐射的破坏准则和池火灾的破坏半径[J]. 中国安全科学学报, 1996, 6(2): 5-10.
- [9] 靳自兵. LNG 储罐发生 UVCE 爆炸火灾事故后果评价研究[J]. 安防科技, 2005(6): 29-33.
- [10] 陈国华. 风险工程学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 165-166.
- [11] Montiel H, Vilchez J A, Casal J, et al. Mathematical modeling of accidental gas releases[J]. Journal of Hazardous Materials, 1998, 59: 211-233.

(收稿日期: 2010-01-18)