

长输天然气管道全口径

泄漏喷射火影响运算模型比较分析

仇立伟（山西天然气有限公司，山西 太原 030000）

宋 超（华新燃气集团，山西 太原 030000）

摘 要：在我省长输天然气管道全口径泄漏事故是较为常见的事故类型，为了避免或降低此类型事故产生的后果，需要管道企业对途经的高风险区域进行定量风险分析，判定危害影响范围。本文对常见的三种泄漏模型进行运算分析，确定产生喷射火焰热辐射影响范围，划定毁伤区域，并且与事故案例的影响情况进行比较，最终找到符合实际情况的运算泄漏模型，为企业进一步开展管道风险分级评估奠定基础。

关键词：全口径泄漏；泄漏速率；喷射火焰热辐射、泄漏模型

0 引言

我省煤炭资源丰富，天然气管道途经采空区、塌陷区等地质灾害高风险区域较多，受此影响全口径断裂泄漏事故占系统内泄漏事故的 50%，因此分析全口径泄漏引发火灾、爆炸的影响半径，寻找较为符合实际的全口径泄漏模型，是本次研究的重点。

1 全口径泄漏模型分析的原因及方案

根据 GB/T34346-2017《基于风险的油气管道安全隐患分级导则》中，天然气管道泄漏造成火灾爆炸的主要形式有蒸汽云爆炸和喷射火，根据 GB32167-2015《油气管道完整性管理规范》，潜在影响半径的计算公式：

$$0.099\sqrt{pd^2}$$

但该公式针对的潜在影响半径为喷射火热辐射影响半径^[1]，并且天然气管道泄漏失效的危害性及影响范围已经超出了目前相关标准的规定^[2]，所以该公式不能够满足目前的管理需求，因此计算出符合实际情况的火灾爆炸影响半径，就必须使用更加准确的运算模型。由于蒸汽云爆炸产生的条件较为苛刻^[3]，因此本文中针对喷射火焰热辐射影响进行分析研究。目前的泄漏计算模型较多，在本文中通过选取三个较为常见的泄漏模型，再利用 Excel 将运算方法进行编辑，并结合实际案例将管道的运行参数输入到模型中，比较各个公式造成的影响半径与实际影响范围的差异，最终选取出较为合理的运算模型。

2 全口径泄漏模型的对比

2.1 常见的三种运算模型

模型 1：

全口径泄漏的气体质量流速计算公式为^[4]：

$$G = \sqrt{\frac{2M}{ZR} \frac{k}{k-1} \frac{T_2 - T_1}{\left(\frac{T_1}{P_1}\right)^2 - \left(\frac{T_2}{P_2}\right)^2}} \quad (1)$$

式中：

G 为气体质量流速，（kg/m²·s）；

M 为摩尔质量，（kg/kmol）；

Z 为压缩因子；

R 为气体常数，（8314J/kmol·K）；

T₁ 为操作温度，（K）；

T₂ 为泄漏点温度，（K）；

k 为理想气体比热容；

P₁ 为管道运行压力，（Pa）；

P₂ 为标准大气压，（Pa）。

描述气体流动与马赫数相关的方程为：

$$\frac{k+1}{2} \ln \left[\frac{P_1 T_2}{P_2 T_1} \right] + \frac{M}{RG^2} \left(\frac{P_2^2}{T_2} - \frac{P_1^2}{T_1^2} \right) + \frac{4kf_f L_e}{D} = 0 \quad (2)$$

式中：

f_f 为范宁摩擦系数；

L_e 为管道实效点的长度，（m）；

D 为管道内径，（m）。

将（1）式采用迭代法代入（2）式，利用迭代法可解得 T₂，求出 Q 气体泄漏速率，kg/s，计算公式如下：

$$Q = C_0 A \sqrt{\frac{2M}{ZR} \frac{k}{k-1} \frac{T_2 - T_1}{\left(\frac{T_1}{P_1}\right)^2 - \left(\frac{T_2}{P_2}\right)^2}} \quad (3)$$

式中：

A 为泄漏孔面积, (m^2);

C_0 为气相泄漏系数, 取值为 0.9。

该公式在计算过程中, 泄漏点温度值成为了该公式的运算重点。

模型 2:

全口径断裂孔径的泄漏模型为^[5]:

$$Q = A M a_1 P_1 \sqrt{\frac{M k}{R T_1} \frac{2}{K+1}} \quad (4)$$

式中:

$M a_1$ 为管道运行状态下马赫数;

其他字母含义同上。

通过能量守恒:

$$\frac{k+1}{2k} \ln \left(1 + \frac{2}{(k+1) M a_1^2} \right) + \left(1 - \frac{1}{M a_1^2} \right) + \frac{4 f_F L_e}{D} = 0 \quad (5)$$

该公式引入了马赫数, 通过计算马赫数来计算泄漏速率。

模型 3 全口径断裂孔径的泄漏模型为^[6]:

$$\frac{k+1}{2} \ln \left[\frac{2 Y_1}{(k+1) M a_1^2} \right] + \left(1 - \frac{1}{M a_1^2} \right) + \left(\frac{4 k f L_e}{D} \right) = 0 \quad (6)$$

$$Y_1 = 1 + \frac{k-1}{2} \bullet M a_1^2 \quad (7)$$

将 (7) 式代入到 (6) 式中采用试插法计算出马赫数。

式中:

A 为管道流通截面积;

A_0 为泄漏孔面积。

泄漏点管道内参数由下列各式确定:

$$P_2 = M a_1 \left(\sqrt{\frac{2 Y_1}{k+1}} \right) \bullet P_1 \quad (8)$$

$$T_2 = \left(\frac{2 Y_1}{k+1} \right) \bullet T_1 \quad (9)$$

$$Q = A M a_1 P_2 \sqrt{\frac{M k}{R T_2}} \quad (10)$$

2.2 范宁摩擦系数的选取

为了保守计算, 同时考虑实际安全问题, 决定选取管道发生完全湍流的独立雷诺系数进行计算^[6]:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 4 \log \left(3.7 \frac{d}{\varepsilon} \right) \quad (11)$$

3 热辐射影响范围的确定

3.1 垂直方向喷射火影响半径

根据 GB/T34346-2017 C.34、C.36 计算垂直方向喷

射火影响半径时公式为:

$$q(r) = 2.02 (P_w r_0)^{-0.09} \eta W_n \Delta H_c / 4 \pi r^2 \quad (12)$$

式中:

$q(r)$ 为热辐射通量;

P_w 为大气中水蒸气的分压 (Pa);

r_0 为目标到火焰表面的距离, (m);

η 为热辐射系数;

W_n 为泄漏速率, (kg/s);

ΔH_c 为介质燃烧热, (kJ/kg);

r 为目标到火焰中心的距离, (m)。

其中, 大气中水蒸气分压 P_w , (Pa)。

$$P_w = 101325 \times RH \times e^{\left(\frac{14.4114}{T_e} - \frac{5328}{T_e^2} \right)} \quad (13)$$

式中:

RH 相对湿度, (%) ;

T_e 为环境温度, (K)。

η 燃烧热辐射系数公式为:

$$\eta = 0.27 P_B^{0.32} \quad (14)$$

式中:

P_B 表示为崩裂压力, 一般为管道的设计压力, (MPa)。

3.2 水平方向喷射火影响半径

$$q(r) = \eta W_n \Delta H_c^2 (4000 \pi r^2) \quad (15)$$

式中:

τ 为大气传输率, $\tau = 1 - 0.056 \ln r$;

其他符号同上。

4 实际案例分析

4.1 事故案例

2017 年 7 月 2 日, 中缅天然气管道在贵州晴隆县境内因当地持续降雨引发公路边坡下陷侧滑, 挤断沿边坡埋地敷设的输气管道, 导致天然气泄漏引发燃烧爆炸, 230m 外的农贸市场受损, 40m 外的楼房烧毁, 350m 外的树叶干枯。该管道管径 1016mm, 运行压力 6.74MPa。事故造成 1 人死亡、23 人受伤^[2]。根据《中石油中缅天然气管道黔西南州晴隆段“6·10”泄漏燃烧较大事故调查报告》该管线的设计压力为 10MPa。天然气的燃烧热, 取值为 55.164MJ/m³, 贵州夏季的平均湿度为 78%, 7 月平均温度为 295.15K, 假设火焰中心到火焰表面平均距离为 5m。

4.2 泄漏速率计算

通过将以上三个泄漏速率计算模型, 利用 Excel 表格将运算方法进行编辑, 计算泄漏速率 (表 1)。

表1 全口径管道泄漏模型的泄漏速率

全口径泄漏模型	压力 (Pa)	运行温度 (K)	管径 (mm)	壁厚 (mm)	上下游阀室之间的距离 (m)	泄漏速率 (kg/s)
1	6740000	298.15	1016	15.3	16000	1166.3
2	6740000	298.15	1016	15.3	16000	876.3
3	6740000	298.15	1016	15.3	16000	1316.8

根据表1,可以看出模型1、3的泄漏速率要比模型2大,因此可以进一步比较三个模型泄漏速率产生的热辐射影响范围,从而分析出更符合实际的运算模型。

4.3 热辐射影响范围

根据《石化装置定量风险评估指南》的定义,确定热辐射通量准则的毁伤阈值范围,(如表2)。

表2 热辐射通量准则定义的毁伤等级与阈值

热通量 q (kW/m ²)	对环境的损坏程度	对人员的伤害程度	区域划分
37.5	生产操作设备遭到严重破坏	10s内1%死亡, 1min内100%死亡	死亡区
25.0	无火焰,长时间辐射下木材引燃的最小能量	10s内二度以上严重烧伤, 1min内100%死亡	重伤区
12.5	有明火时木材长时间暴露而被引燃,塑料熔化所需的最小能量	10s内一度烧伤, 1min内1%死亡	重伤区
4	玻璃暴露30min后可能破裂	超20s引起疼痛,未必起泡	轻伤区
1.6	对建筑物、设备等无破坏	长时间暴露无不适感	安全区

将三个泄漏模型的热辐射影响半径计算后得出,表3。

表3 不同模型在各毁伤区域的影响范围

模型	泄漏速率 (kg/s)	毁伤区域 (kW/m ²)	垂直方向喷射火热辐射影响范围 (m)	水平方向喷射火热辐射影响范围 (m)
1	1166.3	死亡区 (37.5)	215	231
		重伤区 (25.0)	263	281
		重伤区 (12.5)	370	391
		轻伤区 (4)	645	675
		安全区 (1.6)	1005	1045
2	876.3	死亡区 (37.5)	186	201
		重伤区 (25.0)	228	244
		重伤区 (12.5)	293	341
		轻伤区 (4)	555	590
		安全区 (1.6)	873	911
3	1316.8	死亡区 (37.5)	233	245
		重伤区 (25.0)	285	297
		重伤区 (12.5)	400	415
		轻伤区 (4)	690	710
		安全区 (1.6)	1085	1110

4.4 运算模型比较

根据案例给出的受损情况显示,结合表2进行分析,当40m外的楼房烧毁,需要的热辐射能量至少处于重伤区以上的范围内;当230m外的农贸市场受损时,农贸市场需要直接暴露在死亡区,或长时间暴露在重伤区,且热辐射通量至少在12.5kW/m²以上才能产生明显的受损情况;当350m外的树叶发生干枯时,树叶干枯,但未燃烧,这种情况只有当树叶所处的位置在轻伤区以上,重伤区以下时才能够产生这种现象。通过计算不同模型,喷射火热辐射影响范围与实际受损情况进行比较(表4)。

表4 中缅天然气管道燃爆事故影响范围比较

受损情况描述	能够造成改后果的热辐射区域	模型1热辐射影响范围 (m)	模型2热辐射影响范围 (m)	模型3热辐射影响范围 (m)
40m外的楼房烧毁	重伤区以上	370以内可以造成农贸市场受损	293以内可以造成农贸市场受损	400以内可以造成农贸市场受损
230m外的农贸市场受损	重伤区以上	370以内可以造成农贸市场受损	293以内可以造成农贸市场受损	400以内可以造成农贸市场受损
350m外的树叶干枯	重伤以下、轻伤区以上	370-645范围内能够造成树叶干枯且不点燃	293-555范围内能够造成树叶干枯且不点燃	400-690范围内能够造成树叶干枯且不点燃

5 结论

通过对比三种模型,计算出的影响范围等级均能造成40m外楼房烧毁和230m外的农贸市场受损,但要造成350m外的树叶干枯且不点燃只有模型2可以满足这种条件,模型1和3均处于点燃树叶的影响范围内,所以选择模型2较为符合目前的实际应运。

参考文献:

- [1] 王新,刘建平,陈建红.输气管道潜在影响半径计算公式[J].工业安全环保,2019,4(10).
- [2] 戴联双.输气管道泄漏爆炸事故影响范围与相关标准比较分析[Z].中国化学品安全协会论坛,2020.
- [3] SY/T6859-2020.油气输送管道风险评估导则[S].中华人民共和国国家能源局,2020.
- [4] 侯庆民.天然气管道泄漏与天然气在大气中扩散的模拟研究(fluent模拟)[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.
- [5] 王兆芹,冯文兴.高压输气管道泄漏模型[J].油气储运,2009,28(12):28-30.
- [6] AQ/T3046-2013.化工企业定量风险评估导则[S].中华人民共和国国家安全生产监督管理总局,2013.