

天然气管道泄漏模型

向素平¹ 冯良¹ 周义超²

(1. 同济大学机械工程学院 2. 中国人民解放军后勤工程学院)

向素平等. 天然气管道泄漏模型. 天然气工业, 2007, 27(7): 100-102.

摘要 为了得到能适用更广泄漏口径范围的数学模型, 更切合实际地预测天然气管道泄漏所影响的范围, 基于流体状态方程、质量守恒方程、能量方程和动量方程, 结合实际中的限流情况和因紧急切断装置动作造成的不稳定状态, 以及管道泄漏处天然气的流速(音速或是亚音速), 建立了管道泄漏模型。进而求解出各种工况下泄漏口处的天然气状态参数。求解结果与实际基本吻合, 将此管道泄漏模型和扩散模型结合, 得出该泄漏所造成的影响范围, 使抢修工作更加直观。

关键词 天然气 管道泄漏 数学模型 流动速度 参数

为更好地预测天然气泄漏后的扩散情况及所造成的危害, 必须结合天然气的进口参数尽量准确地计算出管道泄漏点处天然气的状态参数, 因为危险区域大小和这些参数密切相关。分析管道泄漏, 目前广泛采用的有 Levenspie^[1]、Crowl^[2] 等人提出的孔隙模型和管道模型。前者视管道为一大容器, 并假设其内部压力保持不变。这种模型未考虑因紧急切断装置动作而形成的不稳定状态, 出流处恒定的流速和状态参数均比实际偏大, 且只适用于泄漏口径很小(相对管道尺寸)的情况。而后者只适用于管道完全破裂的情况。事实上泄漏口径常介于小孔隙和完全破裂这两个极端间, 所以有必要找出一个适用泄漏口径范围更广的管道泄漏模型, 且能考虑到因紧急切断等情况所形成的不稳定状态。

一、模型分析与建立

1. 模型假设

①此模型为一维模型(见图1), 仅讨论中低压燃气管道内气体的流动, 管径相对较小(小于350 mm), 长度约5 km。该情况下可视天然气为理想气

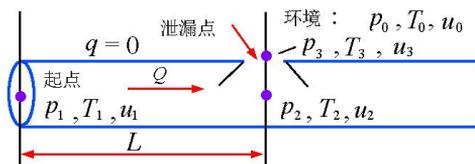


图1 模型示意图

体。②起点至泄漏点的压降仅因为气体膨胀, 不考虑流动摩擦的影响。③不考虑管道和周围环境的换热, 管内流动为绝热流动, $q=0$ 。

2. 模型分析

(1) 泄漏口尺寸

为填补管道模型和孔隙模型这两个极端情况中间的空白, 需要此模型适用的泄漏口径范围更广。

(2) 泄漏口处流速分析

泄漏口处的流速取决于此处的流动是音速还是亚音速, 该流动状态与临界压力比(CPR)相关, 可以用其来界定音速和亚音速, $CPR = p_0 / p_{2c} = [2 / (k + 1)]^{k / (k - 1)}$ 。当出流处(3点)处于临界状态($p_3 = p_0$)时, 2点的压力就是临界压力(p_{2c})。若 $p_2 > p_{2c}$, 出流处流态为音速, $p_3 > p_0$ 。当 $p_2 \leq p_{2c}$ 时, 出流处的流速就是亚音速, 出流状态取决于大气状态, $p_3 = p_0$ 。对于天然气, 绝热指数(k)为1.28, 泄漏至大气环境, 此时临界压力(p_{2c})为 1.82×10^5 Pa。若管内流动是亚音速, 随着泄漏口径的增大, p_2 逐渐减小, 减至 p_{2c} 时, 出流处的流动就由音速变为亚音速。泄漏口径增大, 马赫数(Ma)逐渐增大, 当 Ma 增至1时, 管内流动变为音速, 出流处只会是音速。

(3) 调压装置对流速的限制

实际上, 管道入口处有阀门等限流装置, 限制此处天然气的流速 $u \leq u_{max}$ 。当 $u < u_{max}$ 时, 入口点的压力(p_1)为常数, 随着泄漏口径增大, u 会逐渐增

大,体积流量(Q_v)也不断增大,直至 $w = u_{\max}$ 即 $Q_v = Q_{\max}$ 。此后泄漏口尺寸继续增大, p_1 就不再是一定值,而是会逐渐降低,体积流量保持不变($Q_v = Q_{\max}$), $w = u_{\max}$ 不变。其中(u_{\max})和 Q_{\max} 由调压器决定。

(4)不稳定状态

实际上当泄漏发生一段时间后(如 2 min),紧急切断装置会切断气源,进入参考管段的流量就会逐渐减少。此后流速会逐渐降低,直至泄漏点的压力降至大气压。研究此不稳定状态的情况可以知道在紧急切断装置动作后,泄漏还会持续多长时间,近似为通常意义上的存活时间。

3.模型建立

笔者结合 Helena Montiel 所列模型^[3],基于气体热力学^[4]中管内气体的状态方程、质量守恒方程、能量方程和动量方程建立模型。规定符号如下: $\frac{2}{k}$

$$= l; \frac{k}{k+1} = m; \frac{p_0}{p_2} = n; \frac{Ma_1}{Ma_2} = v; \frac{Y_1}{Y_2} = w; \frac{A_c}{A_{or}} = A; Ma_1 p_1 \left(\frac{kM}{RT_1} \right)^{1/2} = Ma_2 p_2 \left(\frac{kM}{RT_2} \right)^{1/2} = B; \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k}} = C; \left(\frac{Y_2}{Y_1} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{p_0 Ma_2}{p_1 Ma_1} = E。$$

管内亚音速、出流处音速模型为:

$$\begin{cases} Ap^2 \sqrt{\frac{MkC}{RT_2}} = B \\ \frac{k+1}{2k} \ln(v^2 w) + \frac{A^2}{kC} (1-v^2) + \frac{4fL}{D} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

管内和出流处均为亚音速的模型为方程组(2),此时泄漏点处的状态参数与大气态一致:

$$\begin{cases} Ap^2 \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{M}{RT_2} (n^l - n^m)} = B \\ \frac{k+1}{2k} \ln(v^2 w) + \frac{k-1}{2k(E^l - E^m)} A^2 (1-v^2) + \frac{4fL}{D} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

管内和出流处均为音速的模型:

$$\begin{cases} Q_v = A_{or} Ma_1 p_1 \sqrt{\frac{MkC}{RT_1}} \\ \frac{k+1}{2k} \ln \left[\frac{2Y_1}{Ma_1^2 (k+1)} \right] + \frac{A^2}{kC} \left(1 - \frac{1}{Ma_1^2} \right) + \frac{4fL}{D} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

不稳定状态的描述方程为方程组(4):

$$\begin{cases} \frac{p_2'(t)}{p_2^2} = \left(\frac{1}{1+\alpha} \right)^{\frac{2}{m}} \\ \frac{T_2'(t)}{T_2^2} = \left(\frac{1}{1+\alpha} \right)^2 \end{cases} \quad (4)$$

式中: p_0 为大气压力,Pa; p_i 为 i 点的压力,Pa; k 为绝热指数,无因次; Y_i 为无因次量, $Y_i = 1 + (k-1) \times \frac{Ma_i}{2}$; T_i 为 i 点的温度, K; D 为管径, m; ρ 为 i 点的密度, kg/m^3 ; L 为起点到泄漏口中心的距离, m; u_i 为 i 点的速度, m/s; A_c 为管道截面积, m^2 ; $Ma = u_i/C$, 为 i 点的马赫数, 即 i 点的气流速度与当地音速之比, 无因次; A_{or} 为泄漏孔面积, m^2 ; Q_v 为体积流量, m^3/h ; Re 为雷诺数; M 为分子量, $kg/kmol$; 摩擦因子 $f = 0.0232 Re^{-0.1507}$; 下标“or”表示泄漏口; 上标“'”表示为紧急切断装置无动作前参数。

二、模型求解

1.求解方法

基于以上模型,采用 Matlab 编程^[5],通过数值计算中的迭代法^[6]计算出各种工况下的状态参数和流速,见表 1。

表 1 各种工况下的状态参数和流速表

工 况	管内亚音速、出流处音速	管内、出流处均为亚音速	管内、出流处均为音速
①稳定无限速 $Q_v < Q_{\max}$	未知参数: w, p_2, T_2 求解式:(1)	未知参数: w, p_2, T_2 求解式:(2)	未知参数: w, Q_v 求解式:(3)
②稳定限速 $Q_v = Q_{\max}$	未知参数: p_1, w, p_2, T_2 求解式:(1)	未知参数: p_1, w, p_2, T_2 求解式:(2)	未知参数: p_1, Q_v 求解式:(3)
③不稳定状态	未知参数: p_1, w, T_1, p_2, w, T_2 求解式:(1)+(4)	未知参数: p_1, w, T_1, p_2, w, T_2 求解式:(2)+(4)	未知参数: p_1, w, T_1 求解式:(3)+(4)

2.实际计算

设最初工况 $p_1 = 5 \times 10^5$ Pa; $T_1 = 288$ K; $D = 163.6$ mm; $L = 1000$ m; $M = 17.4$ kg/kmol; $\rho = 3.68$ kg/ m^3 ; $w = 1.01 \times 10^{-5}$ kg/ms。 $Q_{\max} = 9130$ m^3/h ; 假设事故发生 2 min 后切掉气源,该工况设定泄漏口孔径 $d_{or} = 65$ mm。

如图 2 所示,在工况 1 下,随孔径增大,泄漏口处的流动由音速变为亚音速;而在工况 2 下,在更小的孔径(87 mm)处,泄漏口处流态就会发生这种变化。临界点位置前移的原因是限流装置开始对流动产生影响,导致入口处的压力(p_1)减小。从图 3 可知孔径大于 65 mm 后,随着孔径增大, p_1 会逐渐减

小。而图 4 正好显示在泄漏孔径为 65 mm 时,流量达到限定流量。据图示及分析,当泄漏口尺寸大于一定值,限流装置开始对流动产生影响,限定流量保持最大值不变,和没有限流的工况 1 相比,工况 2 限流后,其状态参数都会相应地减小。实际上流量减小会导致流速和压力减小,进而影响到密度和温度也变小,该模型符合实际情况。

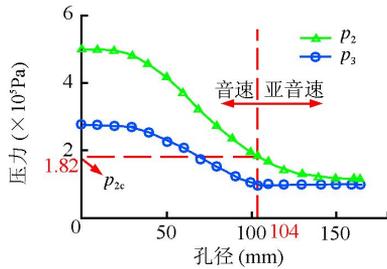


图 2 工况 1 下的压力分布图

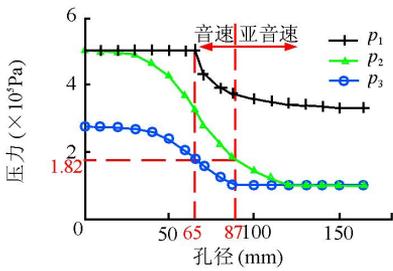


图 3 工况 2 下的压力分布图

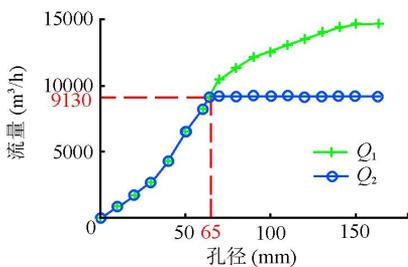


图 4 工况 2 下的流量分布图

结合图 5 和图 6,泄漏发生 120 s 后,因为紧急切断装置动作,流量开始降低,压力也开始降低。在 $t=135$ s 时,泄漏口处压力 (p_3) 降到大气压,但这时 p_2 仍然大于大气压。随后 p_3 保持大气压不变, p_2 会继续逐渐减小,直到 $t=164$ s 时 $p_2 = p_0$ 。此时虽

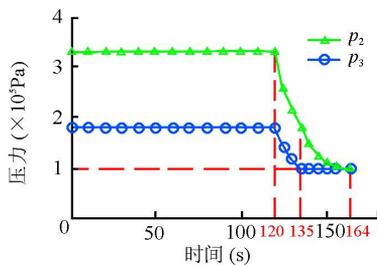


图 5 工况 3 下的压力分布图

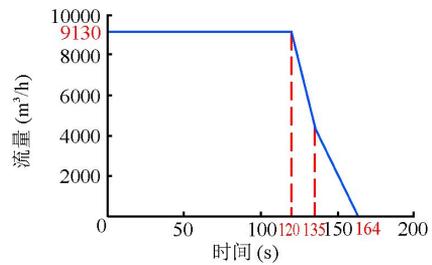


图 6 工况 3 下的流量分布图

然管内还有天然气,但因为管内和出流处的压力均已降至大气压,泄漏停止。正如图 7 所示,在 $t=164$ s 时泄漏口处 $Q_v=0$ 。这点同样也说明该模型和实际情况相符合。

三、结 论

本模型可适用的泄漏口尺寸范围广,不再局限于很小的孔口和完全破裂的管道;明确泄漏口出流状态从音速转变为亚音速的临界点,并将这两种情况分开讨论,使模型更加严密;考虑管道进口限流装置对流速的限制;讨论了不稳定状态,即在实际情况下,泄漏发生一段时间后会有关急切断装置切断气源。本模型的计算结果和实际基本符合。此外,这种准确的计算还能更好地发挥各种扩散模型^[7,8](例如经典的高斯模型)的作用。如将本模型和扩散模型结合,得出该泄漏所造成的影响范围,对抢修工作具有直观且较准确的指导意义。

参 考 文 献

- [1] LEVENSPIEL O. Engineering flow and heat exchange [M]. New York: Plenum press, 1984.
- [2] CROWL D A. Chemical process safety: fundamentals with applications [M]. NJ: Prentice-Hall, 1990.
- [3] HELENA MONTIEL. Mathematical modelling of accidental gas releases [J]. Journal of Hazardous Materials, 1998, 59(2): 211-233.
- [4] 廉乐明,李力能,吴家正,等. 工程热力学 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- [5] 赵静,但琦. 数学建模与数学实验 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.
- [6] 林成森. 数值计算方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [7] 王大庆,高惠临. 天然气管线泄漏扩散及危害区域分析 [J]. 天然气工业, 2006, 26(7): 120-122.
- [8] 吴小庆,王宁,江茂泽. 关于输气管道的一个泄漏点的检测问题 [J]. 西南石油学院学报, 2006, 28(3): 27-29.

(修改回稿日期 2007-06-06 编辑 赵 勤)