

高压输气管道泄漏模型

王兆芹* 冯文兴 李在蓉 项小强 李保吉

(中国地质大学)

(中国石油管道研究中心)

程五一

(中国地质大学)

王兆芹 冯文兴等:高压输气管道泄漏模型,油气储运,2009,28(12) 28~30.

摘 要 介绍了输气管道泄漏率的大孔模型和管道模型的特点及求解方程。分析了泄漏孔的孔径与管径等参数对大孔模型管道内压力、温度和气体泄漏率的影响。随着泄漏孔的孔径与管径比值(d/D)的增大,泄漏点压力和温度降低,气体泄漏率增加。提出可以用泄漏孔的孔径与管径的比值(d/D)作为工程计算的模型应用判断条件。在90%的准确度下,当 $d/D \geq 0.6$ 时,使用管道模型计算泄漏率简单方便;当 $0.2 < d/D < 0.6$ 时,宜采用大孔模型。

主题词 输气管道 泄漏率 大孔模型 管道模型 比较

一、前 言

输气管道泄漏会泄放大量的天然气,造成严重的人员伤亡和财产损失。据统计,输气管道泄漏事故中,大孔泄漏和管道破裂分别占管道事故的29%和17%^[1]。

高压输气管道泄漏后果的研究一直是燃气输运安全领域的热点^[2]。近年来,国内外相关专家和学者针对输气管道泄漏模型进行了一系列研究,提出了小孔模型,管道模型和大孔模型^[3~6]。根据研究结果^[7],小孔模型适用于孔径/管径不超过0.2 mm的范围;大孔模型假设较少,计算过程包含很多未知数,需多次求解高次方程,使用很不方便;管道模型是大孔模型的特殊情况,可大量减少计算过程中的未知数,计算方便。工程计算精度满足要求时,采用管道模型估算大孔泄漏的泄漏速率较为方便。

针对大孔模型的流动状况,Montiel等人^[8]认为,当管内气体为亚临界流动时,在泄漏孔处是临界流等熵流动或亚临界流运动;当管内气体为临界流动时,孔口处为临界流动。而董玉华等人^[9]认为,只存在泄漏孔处为临界流或亚临界流运动(管内气体为亚临界流动)的情况。

泄漏速率是分析泄漏扩散及评价事故后果的基础,就大孔模型和管道模型的适用范围,大孔泄漏时

对应的流动状况以及对影响泄漏率的物理参数开展了研究。

二、泄漏模型的计算公式

输气管道泄漏示意图见图1。设管道泄漏点与输气点间的距离为 Le ,管道输气起点中心点位置为1,泄漏口中心点位置为2,泄漏口位置为3。

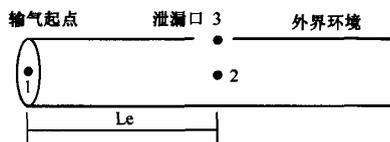


图1 天然气管道泄漏示意图

1、大孔模型

高压管道大孔泄漏可能存在三种状态。当孔径较小时,泄漏点压力 P_2 稍低于起始压力 P_1 ,且远高于临界压力 P_{2c} ($P_{2c} = (\frac{k+1}{2})^{\frac{1}{k-1}} \cdot P_a$, P_a 为大气压力),此时泄漏过程为管内亚临界流,孔口为临界流状态;随着孔径的进一步增大, P_2 远低于 P_1 ,但依旧高于临界压力 P_{2c} ,此时泄漏过程变为管内、孔口均处于临界流状态;当孔径增大到接近管径时,可能出现 P_2 低于 P_{2c} ,则泄漏过程为管内临界流,孔口为亚临界流状态。根据能量和动量守恒分析,当管

* 100083,北京市海淀区学院路29号;电话:(010)82320597.

内为临界流时, 孔口流动只可能处于临界流状态, 第三种状态是不可能存在的。因此, 针对高压输气管道, 只分析两种状态, 一种是管内为亚临界流、孔口为临界流状态; 另一种是管内、孔口均为临界流状态。对于低压情况, 存在两种泄漏状态, 当孔径较小时, 泄漏点压力 P_2 稍低于起始压力 P_1 , 远高于临界压力 P_{2c} , 此时泄漏过程为管内亚临界流, 孔口临界流状态; 当孔径较大时, 管内、孔口均处于亚临界流。

管内气体流动为亚临界流过程, 孔口为临界流等熵膨胀过程的求解方程式为:

$$\begin{aligned}
 Q &= AP_2 \sqrt{\frac{Mk}{RT_2} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k}}} \\
 T_2 &= \left(\frac{Y_1}{Y_2}\right) T_1 \\
 P_2 &= \left(\frac{Ma_1}{Ma_2}\right) \sqrt{\frac{Y_1}{Y_2}} P_1 \\
 \frac{k+1}{2k} \ln \left[\left(\frac{Ma_1}{Ma_2}\right)^2 \frac{Y_1}{Y_2} \right] + \frac{\left(\frac{A_0}{A}\right)^2}{k \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k}}} \left[1 - \left(\frac{Ma_1}{Ma_2}\right)^2 \right] \\
 + \left(\frac{4fL_e}{D}\right) &= 0 \\
 Y_i &= 1 + \left(\frac{k-1}{2}\right) Ma_i^2 \tag{1}
 \end{aligned}$$

- 式中 Q —— 质量泄漏率, kg/s;
 A —— 泄漏孔面积, m^2 ;
 k —— 气体绝热系数;
 M —— 物质的摩尔质量, kg/kmol;
 R —— 气体常量, 通常取 $8.314 \text{ kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$;
 P_i —— $i(i=1, 2, 3)$ 点的压力, Pa;
 T_i —— $i(i=1, 2, 3)$ 点的温度, K;
 f —— 管道摩擦系数;
 L_e —— 管道当量长度, m;
 D —— 管道直径, m;
 A_0 —— 管道截面积, m^2 。
 Ma_i —— $i(i=1, 2)$ 点的马赫数。

管内气体流动为临界流过程, 孔口为临界流等熵膨胀过程的求解方程式为:

$$\begin{aligned}
 Q &= AMa_1 P_1 \sqrt{\frac{Mk}{RT_1} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k}}} \\
 \frac{k+1}{2k} \ln \left(\frac{2Y_1}{(k+1)Ma_1^2} \right) + \frac{\left(\frac{A_0}{A}\right)^2}{k \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k}}} \left(1 - \frac{1}{Ma_1^2} \right) \\
 + \left(\frac{4fL_e}{D}\right) &= 0 \tag{2}
 \end{aligned}$$

2、管道模型

当管道发生全截面断裂或泄漏孔径与管径接近时, $d=D, P_2=P_3=P_c$, 泄漏率为:

$$\begin{aligned}
 Q &= A_0 Ma_1 P_1 \sqrt{\frac{Mk}{RT_1} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k}}} \\
 \frac{k+1}{2k} \ln \left(1 + \frac{2}{(k+1)Ma_1^2} \right) + \left(1 - \frac{1}{Ma_1^2} \right) + \left(\frac{4fL_e}{D} \right) &= 0 \tag{3}
 \end{aligned}$$

三、大孔模型的计算实例

某输气管道管径 D 为 1 219 mm, 管内起点压力 P_1 为 12 MPa, 气体温度 T_1 为 288.15 K, 管道粗糙度为 $46 \mu\text{m}$, 天然气甲烷含量为 94.72%, 摩尔质量为 17.097 kg/kmol, 假定距管道起点等效长度 L_e 为 10 km 处管道发生失效。

1、管道内压力 P_2 、温度 T_2 的变化

$P_1=8 \text{ MPa}, T_1=288.15 \text{ K}$ 时, P_2, T_2 随 d/D 值的变化曲线见图 2 和图 3。当 $d/D > 0.2$ (大孔泄漏) 时, 管内 P_2 随着泄漏孔径的增大迅速下降; T_2 也随着泄漏孔径的增大而下降, 但开始阶段的下降速率较慢。管径的改变对 P_2 的下降较为敏感, 管径大, P_2 值相应增加; 管径的改变对 T_2 没有影响。

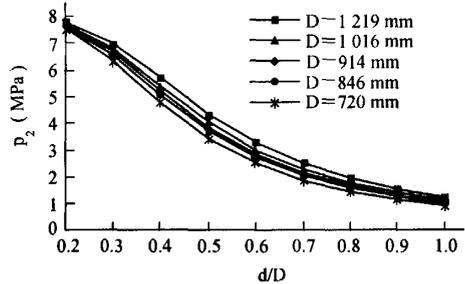


图 2 P_2 与 d/D 值的关系曲线

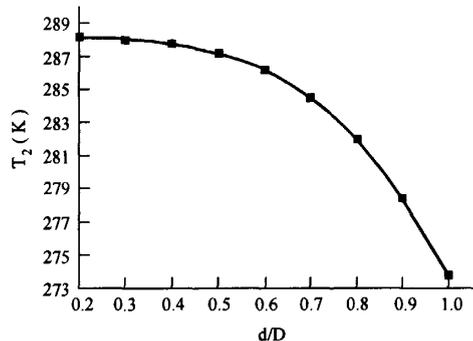


图 3 T_2 与 d/D 值的关系曲线

2、气体泄漏率

图 4 为不同起始压力下,发生大孔泄漏时, $D=1\ 219\ \text{mm}$ 管道的气体泄漏率。 d/D 从 0.2 逐渐增长到 1 时,孔口泄漏一直保持临界流状态,与大孔泄漏模型的分析结果相一致,即高压管道泄漏只存在管内为亚临界流、孔口为临界流和管道与孔口均为临界流两种状态,不存在管内、孔口均为亚临界流状态。

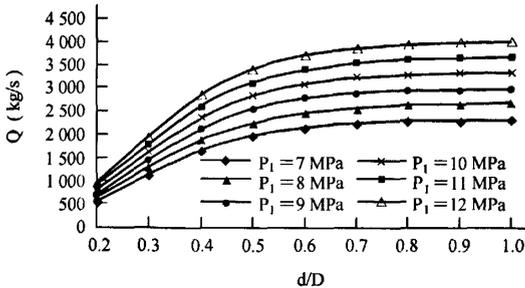


图 4 不同起始压力条件下气体的泄漏率

四、两种泄漏模型计算结果的比较

图 5 为管道发生大孔泄漏时,两种泄漏模型计算得到的气体泄漏率。大孔模型泄漏率随着孔径的增大而增加,其增势逐渐趋缓,最后趋近于管道模型计算值。

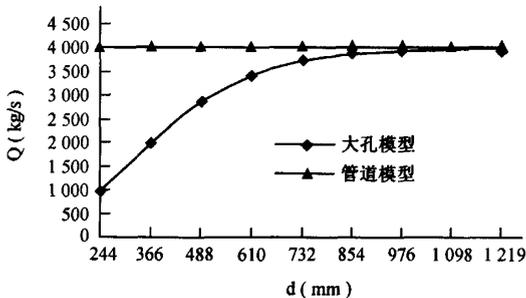


图 5 不同模型质量泄漏率随孔径的变化

图 6 为管道压力为 12 MPa 时,大孔模型与管道模型计算的泄漏率的比值。可以看出,当 d/D 较大时,在一定的准确度下,两个模型计算结果相近,此时采用管道模型可以简化计算;当 d/D 较小时,则采用大孔模型才能满足工程计算准确性的要求。例如,准确度在 90% 以上,当 $0.2 < d/D < 0.6$ 时,工程计算采用大孔模型;当 $d/D \geq 0.6$ 时,工程计算可采用管道模型。

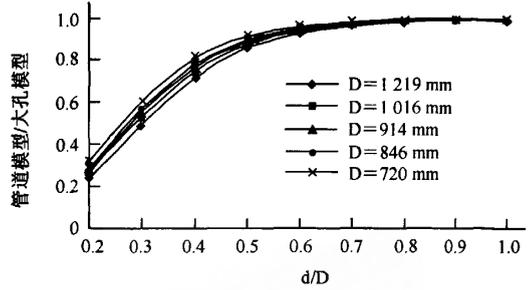


图 6 管道模型与大孔模型计算结果的比值与 d/D 值的关系

五、结 论

(1) 高压管道发生大孔泄漏时,随着泄漏孔的孔径与管径比值(d/D)的增大,泄漏点压力和温度降低,气体泄漏率增加。

(2) 可以将泄漏孔与管径的比值(d/D)作为工程计算中的模型应用判断条件。在 90% 的准确度下,当 $d/D \geq 0.6$ 时,使用管道模型计算泄漏率简单方便;当 $0.2 < d/D < 0.6$ 时,则采用大孔模型。

参 考 文 献

- 1, 向启贵 熊 军;天然气管道环境风险评价,石油与天然气化工,2002,31(1)。
- 2, 肖建兰 吕保和等;气体管道泄漏模型的研究进展,煤气与热力,2006,26(2)。
- 3, 潘旭海 蒋军成;事故泄漏源模型研究与分析,南京工业大学学报,2002,24(1)。
- 4, 于 明 狄 彦等;输气管道泄漏率计算与扩散模拟方法述评,管道技术与设备,2007(4)。
- 5, 霍春勇 董玉华等;长输管线气体泄漏率的计算方法研究,石油学报,2004,25(1)。
- 6, 杨 昭 张甫仁等;非等温长输管线稳态泄露计算模型,天津大学学报,2005,38(12)。
- 7, 冯文兴 王兆芹等;高压输气管道小孔泄漏与大孔泄漏模型比较分析,安全与环境工程,2009,16(4)。
- 8, Montiel H, Vilchez J A et al; Mathematical modeling of accidental gas releases,J. Hazard Mater. ,1998,59.
- 9, 董玉华 周敬恩等;长输管线稳态气体泄漏率的计算,油气储运,2002,21(8)。

(收稿日期:2009-02-16)