

高压输气管道小孔与大孔泄漏模型比较分析

冯文兴¹,王兆芹^{1,2},程五一²

(1. 中国石油管道研究中心,河北 廊坊 065000,2. 中国地质大学工程技术学院,北京 100083)

摘要: 分析了计算输气管道泄漏率的大孔模型和小孔模型的特点和差异,研究了两个模型的适用范围,得出在工程计算中应以泄漏孔的孔径与管径的比值(d/D)大小作为模型应用的条件,即:当 $d/D \leq 0.2$ 时,使用小孔泄漏模型计算泄漏率简单、准确;当 $d/D > 0.2$ 时,则采用大孔泄漏模型。

关键词: 输气管道;泄漏率;小孔泄漏模型;大孔泄漏模型;管道模型

中图分类号:TE88 文献标识码:A 文章编号:1671-1556(2009)04-0108-03*

Analysis of the Nozzle Model and Hole Model Associated with High-pressure Natural Gas Pipeline Leakage

FENG Weng-xing¹, WANG Zhao-qin^{1,2}, CHENG Wu-yi²

(1. PetroChina Pipeline R & D Center, Langfang, 065000 China;

2. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: This paper studies the characteristics and application conditions of the hole model and the nozzle model for natural gas pipeline leakage. The differences of the two models are also researched. It is suggested that the ratio of the diameter of hole to the diameter of pipeline (d/D) should be used as the criteria to select the appropriate model in the engineering application. When $d/D \leq 0.2$, it is convenient and accurate to calculate the release rate with nozzle model, and when $d/D > 0.2$, the hole model should be selected.

Key words: natural gas pipeline; release rate; hole model; nozzle model; pipeline model

0 引言

近年来,随着高压输气管道的快速发展,管道泄漏事故时有发生,并造成了严重的人员伤亡和财产损失,从而使得输气管道泄漏后果的研究成为燃气输运安全领域研究的热点^[1]。泄漏速率的确定是分析泄漏扩散及评价事故后果的基础,其依据的模型是小孔泄漏模型、管道模型和大孔泄漏模型。小孔泄漏模型假设较多,计算方便,工程计算精度要求不高时,一般采取小孔泄漏模型;大孔泄漏模型假设较少,计算结果较为准确,但是计算过程需要多次求解高次方程,使用不方便;管道模型则是大孔泄漏模型的特殊情况。

应用小孔泄漏模型进行计算时,需要判断泄漏

参考点的压力是否改变,由于没有明确规定孔径的大小,因而难以判断。很多研究者^[2~4]及欧洲输气管道事故数据组织(EGIG)统计分类标准^[5],将小孔规定为小于 20 mm;杨昭等^[6]通过单一工程状况认为小孔泄漏模型的适用范围与管径相关。因此,如何确定小孔泄漏模型、大孔泄漏模型的适用范围具有重要的意义。

1 输气管道泄漏模型

图 1 为输气管道泄漏示意图。图 1 中,位置 1 为管道输气起点中心点,位置 2 为泄漏口中心点,位置 3 为泄漏口。

1.1 小孔泄漏模型

小孔泄漏模型假设泄漏口是一个足够小的孔,

* 收稿日期:2009-02-16 修回日期:2009-04-01

作者简介:冯文兴(1979—),男,博士,工程师,主要从事风险评价研究。E-mail:wxfeng@mail.ustc.edu.cn



图 1 输气管道泄漏示意图

Fig. 1 Schematic of leakage of natural gas pipeline

管道是一个容积足够大的容器,管道内压力不受泄漏影响而发生变化,位置 1 和 2 的气体状态相同,气体膨胀过程为等熵过程,因此气体泄漏率恒定,等于起始最大泄漏率,即

当 $\frac{P_a}{P_1} > (\frac{2}{k+1})^{\frac{k+1}{k}}$ 时,孔口气体泄漏为临界流,

泄漏率为

$$Q = A P_1 \sqrt{\frac{Mk}{RT_1} (\frac{2}{k+1})^{\frac{k+1}{k}}} \quad (1)$$

当 $\frac{P_a}{P_1} < (\frac{2}{k+1})^{\frac{k+1}{k}}$ 时,孔口气体泄漏为非临界流,泄漏率为

$$Q = A P_1 \sqrt{\frac{2M-k}{RT_1 k-1} [(\frac{P_a}{P_1})^{\frac{2}{k}} - (\frac{P_a}{P_1})^{\frac{k+1}{k}}]} \quad (2)$$

式中: Q 为质量泄漏率 (kg/s); A 为泄漏孔面积 (m^2); k 为气体绝热系数; M 为物质的摩尔质量 (kg/kmol); R 为气体常量,通常取 $8.314 [kJ/(kmol \cdot K)]$; P_i 为起始点压力 (Pa); P_a 为大气压力 (Pa); T_i 为第 i 位置的温度 ($i=1,2,3$) (K)。

1.2 大孔泄漏模型

当管道破坏的尺寸较大时,需要用大孔泄漏模型进行计算,此时气体的流动状态至关重要。

对于高压输气管道,气体的流动状态主要有两种:

(1) 当孔径较小时,泄漏口中心点压力 P_2 稍小于起始点压力 P_1 ,且远远大于临界压力 P_{2c} [计算公式为:

$$P_{2c}/P_a = (\frac{k+1}{2})^{\frac{k}{k-1}}], 此时泄漏过程为管道内为亚临界流、泄漏孔为临界流的等熵膨胀过程,求解方程为$$

$$\left\{ \begin{aligned} T_2 &= (\frac{Y_1}{Y_2}) T_1, P_2 = (\frac{M a_1}{M a_2}) \sqrt{\frac{Y_1}{Y_2}} P_1 \\ G &= (\frac{A}{A_0}) P_2 \sqrt{\frac{Mk}{RT_2} (\frac{2}{k+1})^{\frac{k+1}{k}}} = M a_1 P_1 \sqrt{\frac{Mk}{RT_1}} \\ &= M a_2 P_2 \sqrt{\frac{Mk}{RT_2}} \\ \frac{k+1}{2k} \ln(\frac{M a_2^2}{M a_1^2} \cdot \frac{Y_1}{Y_2}) + \frac{(\frac{A_0}{A})^2}{k(\frac{2}{k+1})^{\frac{k+1}{k}}} (1 - \frac{M a_2^2}{M a_1^2}) + (\frac{4fL_e}{D}) &= 0 \\ Q &= A P_2 \sqrt{\frac{Mk}{RT_2} (\frac{2}{k+1})^{\frac{k+1}{k}}} \end{aligned} \right. \quad (3)$$

式中: f 为管道摩擦系数; L_e 为管道当量长度 (m); D 为管道直径 (m); A_0 为管道截面积 (m^2); G 为气体的质量流速 [$kg/(m^2 \cdot s)$]; $Y_i = 1 + (k-1) M a_i^2/2$, $M a_i$ 为 i 位置的马赫数 ($i=1,2$); 其他符号同上。

(2) 随着孔径进一步增大, P_2 远远小于 P_1 ,但依旧大于临界压力 P_{2c} ,此时泄漏过程变为管道内与泄漏孔均为临界流的等熵膨胀过程,求解方程为

$$\left\{ \begin{aligned} Q &= A M a_1 P_1 \sqrt{\frac{Mk}{RT_1} (\frac{2}{k+1})^{\frac{k+1}{k}}} \\ \frac{k+1}{2k} \ln(\frac{2Y_1}{(k+1) M a_1^2}) + \frac{(\frac{A_0}{A})^2}{k(\frac{2}{k+1})^{\frac{k+1}{k}}} (1 - \frac{1}{M a_1^2}) + (\frac{4fL_e}{D}) &= 0 \end{aligned} \right. \quad (4)$$

1.3 管道模型

管道模型是管道破裂或泄漏孔径与管径接近相等时所采用的模型。此时, $A = A_0, P_2 = P_3 = P_a$,代入公式(3)即可得到管道模型的计算公式。

2 3种模型的计算与比较

选取某输气管道 20 km,管道管径 $D = 1219$ mm,管内起点压力 $P_1 = 12$ MPa,气体温度 $T_1 = 288.15$ K,管道粗糙度为 $46 \mu m$,管内天然气甲烷含量为 94.72%,摩尔质量为 17.097 kg/kmol,假定距管道起点等效长度 $L_e = 10$ km 处管道发生失效,利用上述 3 种泄漏模型进行泄漏率的计算和比较。

2.1 气体泄漏率的计算

图 2 为依据 3 种模型计算得到的气体泄漏率与孔径的关系曲线。由图 2 可以看出:泄漏率随着孔径的增大先迅速增加,其后缓慢增长,最后趋于恒定值;当孔径 $d < 244$ mm 时,大孔泄漏模型与小孔泄漏模型的计算结果几乎完全重合;当孔径 $d > 1097$ mm 时,大孔泄漏模型和管道模型重合。由此可见,使用不同的泄漏模型所对应的孔径范围是不同的,

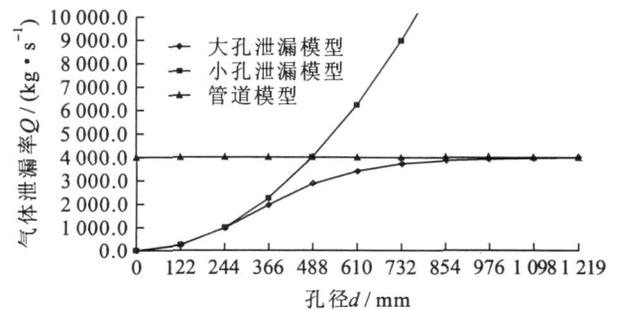


图 2 气体泄漏率随孔径的变化

Fig. 2 Relationship between leakage rate and hole diameter

即当孔径较大时,使用小孔泄漏模型不合适。

2.2 小孔泄漏模型与大孔泄漏模型泄漏率的比值与 d/D 值的关系

图 3 为管道压力为 12 MPa 时,小孔泄漏模型与大孔泄漏模型计算的泄漏率的比值与 d/D 值的关系曲线。由图 3 可以看出:当 d/D 较小时,在一定的准确度下,两个模型计算结果相近,此时采用小孔泄漏模型可以简化计算;而当 d/D 较大时,则采用大孔泄漏模型才能满足工程计算准确性的要求。例如,准确度在 95% 以上,当 $d/D = 0.2$ 时,工程计算采用小孔泄漏模型为宜。

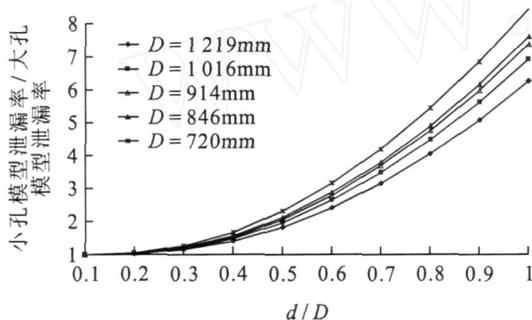


图 3 小孔泄漏模型与大孔泄漏模型泄漏率的比值与 d/D 值的关系 ($L_e = 10 \text{ km}$)

Fig. 3 Results from the hole model and the nozzle model vs. d/D ($L_e = 10 \text{ km}$)

在泄漏后果评价中,很多研究者将欧洲输气管道事故数据组织(EGIG)的统计分类标准(将小孔定义为小于 20 mm)作为对泄漏孔径的分类参考。但

由图 3 可知,在计算泄漏率时,这样的分类标准并不合适,当管径足够大时,小孔泄漏模型的适用孔径范围也变大了,可以达到 200 mm(当 $D = 1219 \text{ mm}$ 时)。因此,在进行后果评价时,应该采用更为合适的分类标准,即在工程计算中依据 d/D 值来选用泄漏模型更为可靠。

3 结论

(1) 高压气体管道发生大孔泄漏时,存在两种泄漏过程,即:管道亚临界流、孔口临界流;管道与孔口均为临界流。

(2) 当 $d/D = 0.2$ 时,采用小孔泄漏模型计算,准确、简单;当 $d/D > 0.2$ 时,采用大孔泄漏模型计算方能获得较为准确的结果。

参考文献:

- [1] 张甫仁. 燃气管线动态泄漏扩散的危险性分析[J]. 重庆建筑大学学报,2007,29(2):103-109.
- [2] 肖建兰,吕保和,王明贤,等. 气体管道泄漏模型的研究进展[J]. 煤气与热力,2006,26:(2)7-9.
- [3] 霍春勇,董玉华,余大涛,等. 长输管线气体泄漏率的计算方法研究[J]. 石油学报,2004,25(1):101-105.
- [4] 董玉华,周敬恩,高惠临,等. 长输管道稳态气体泄漏率的计算[J]. 油气储运,2002,21(8):11-15.
- [5] European Gas Pipeline Incident Data Group. Gas Pipeline Incident[R]. European Gas Pipeline Incident Data Group,2005.
- [6] 杨昭,张甫仁,赖建波. 非等温长输管线稳态泄露计算模型[J]. 天津大学学报,2005,38(12):1115-1120.

(上接第 107 页)

- [2] 陈群策,安美建,李方全. 水压致裂法三维地应力测量的理论探讨[J]. 地质力学学报,1998,4(1):37-43.
- [3] 刘允芳. 岩体地应力与工程建设[M]. 武汉:湖北科学技术出版社,2000.
- [4] 刘允芳. 水压致裂法三维地应力测量[J]. 岩石力学与工程学报,1991,10(3):246-256.

- [5] 安其美,李宏. 雅砻江锦屏一级水电站坝区水压致裂法地应力测试研究[R]. 北京:中国地震局地壳应力研究所,2003.
- [6] Kuriyagawa, M., H. Kobayashi, I. Matsunaga, et al. Application of hydraulic fracturing to three-dimensional in situ stress measurement[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr., 1989,26:589-593.