

研究论文

天然气管道泄漏速率的确定

刘中良¹, 罗志云¹, 王皆腾¹, 张 建², 孙晓春²

¹ 北京工业大学环境与能源工程学院, 教育部传热强化与过程节能重点实验室, 北京 100022;

² 胜利油田胜利工程设计咨询有限责任公司, 山东 东营 257026)

摘要: 天然气泄漏速率是模拟评价天然气管线泄漏事故过程中的重要因素之一, 对其研究将有利于提高模拟评价结果的正确性。应用热力学和气体动力学理论, 结合理想气体状态方程、绝热方程和能量守恒方程, 研究分析了天然气管道的泄漏过程, 分别给出了在临界泄漏阶段以及亚临界泄漏阶段的泄漏速率计算公式, 为天然气管输安全工程的相关计算提供了可靠的理论依据。

关键词: 天然气泄漏速率; 临界泄漏阶段; 亚临界泄漏阶段

中图分类号: TE 873

文献标识码: A

文章编号: 0438-1157 (2008) 08-2121-06

Analytical calculation of leakage rate for natural gas pipelines

LIU Zhongliang¹, LUO Zhiyun¹, WANG Jieteng¹, ZHANG Jian², SUN Xiaochun²

¹ Key Laboratory of Enhanced Heat Transfer and Energy Conservation, Ministry of Education, College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China; ² Shengli Engineering Design and Consultation Company of Shengli Oil Field, SINOPEC, Dongying 257026, Shandong, China)

Abstract: As the leakage rate is one of the important factors of natural gas pipeline operation that have not been well defined, it is necessary and important to give an analytical equation for the leakage flow rate of natural gas pipelines to improve the accuracy of simulation and estimation of leakage accidents. Based on the theories of thermodynamics and fluid mechanics, together with the use of ideal gas equation of state, adiabatic equation and energy conservation equation, the natural gas leakage process was studied and divided into two leakage phases, the critical phase and the sub-critical phase. Equations were obtained for calculating the leakage flow rate of the whole leakage process, and examples were given to analyze the influences of various parameters on leakage flow rate.

Key words: natural gas leakage flow rate; critical leakage phase; sub-critical leakage phase

引 言

管道腐蚀、自然破坏、人为破坏以及管道自身缺陷等因素均可能突然导致天然气长输管道发生泄漏^[1], 而天然气管道一旦泄漏, 由于它易燃、易

爆、易扩散的特性, 将会带来火灾、爆炸、环境污染、人员伤亡等严重后果。近年来国内外已经逐步展开对天然气管道泄漏后相关过程的研究^[2-8]。

天然气扩散是一种非常复杂的大气污染物扩散过程, 在对其模拟评价过程中存在大量不确定性因

2007-10-23 收到初稿, 2008-05-06 收到修改稿。

联系人及第一作者: 刘中良 (1958—), 男, 教授。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50676002)。

Received date: 2007-10-23.

Corresponding author: Prof. LIU Zhongliang. E-mail: liuzhl@bjut.edu.cn

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (50676002).

素, 这些不确定性因素直接影响了模拟结果的正确性, 泄漏速率或泄漏量即为其中之一^[9-10]。本文结合热力学、气体动力学等基础理论, 给出了气体在泄漏过程中不同阶段的气体泄漏速率计算模型, 为评价管道失效损失大小以及管线定量风险后果分析提供了重要的参考指标。

1 基本假设及气体泄漏速率模型

天然气管道泄漏一般为孔口泄漏^[11-12]或裂缝泄漏, 管道泄漏示意图见图 1^[13]。天然气管道泄漏是一个及其复杂的物理过程, 为了使问题得到初步简化以分析得到天然气管道泄漏时的泄漏速率计算公式, 作如下假设。

(1) 天然气可视为单一性质的理想气体, 忽略泄漏过程中因温度变化而可能产生的相变效应。

(2) 目前, 在管道设计中, 一般都设有自动关断装置, 以最大限度地减小天然气泄漏可能引发的危险、危害。因此, 本文假设在泄漏发生的同时, 管道的关断装置立即启动。于是, 泄漏管道即可被简化为一个固定容积的刚性容器, 同时, 忽略由于管道泄漏而引发的管道内部气体的宏观流动。

(3) 实际计算表明, 泄漏发生后, 除非泄漏口非常小, 一般在较短的时间内被关断在泄漏管段内的天然气就可以泄漏完毕, 因此, 作为初步近似, 可以认为泄漏是一个快速过程, 忽略管内气体与环境之间的热量交换, 从而可以将泄漏过程视为绝热的^[14]。

(4) 泄漏管段的体积(有效容积)为 V (它可以根据泄漏管段的长度和管道内径计算, m^3) 且不随压力和温度变化; 泄漏发生时泄漏管段内天然气的初始压力为 p_0 (Pa), 初始温度为 T_0 (K); 环境温度为 T_{sur} (K), 大气压力为 p_{sur} (Pa), 文中下角标“sur”表示与外界环境对应的参数。

(5) 泄漏口只有一个且其孔径 d (m) 或面积 A (m^2) 为已知。

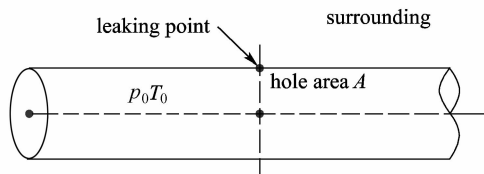


图 1 天然气管道泄漏示意图

Fig. 1 Sketch of gas leakage

2 基本方程

根据开口系统能量守恒方程^[15], 在设定的条件下

$$\frac{dE_{CV}}{d\tau} + \left(h_e + \frac{1}{2}c^2 \right) \dot{m} = 0 \quad (1)$$

式中 E_{CV} 是控制容积的内能, J; h_e 是出口处气流的比焓, $J \cdot kg^{-1}$; c 是泄漏口(出口)气流的速度, $m \cdot s^{-1}$; \dot{m} 是天然气泄漏速率, $kg \cdot s^{-1}$; τ 是时间, s。控制容积的内能可以用式(2)计算

$$E_{CV} = mc_v T \quad (2)$$

式中 m 是控制容积内天然气(剩余)质量, kg; c_v 是天然气的比定容热容, $J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$; T 是天然气的温度, K。气体焓可以用比定压热容和温度的乘积来计算, 即

$$h_e = c_p T_e \quad (3)$$

式中 c_p 是天然气的比定压热容, $J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$; T_e 是泄漏口出口界面处气流的温度, K。将式(2)和式(3)代入式(1)得到

$$\frac{d}{d\tau} (mc_v T) + \left(c_p T_e + \frac{1}{2}c^2 \right) \dot{m} = 0 \quad (4)$$

值得指出的是, 由于天然气输送管道的压力通常比较高(5~10 MPa), 所以在刚刚开始泄漏的一段时间内, 环境压力与管道内气体压力之比小于临界压比^[15], 即

$$\frac{p_{sur}}{p} < \beta_{cr} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (5)$$

式中 p 是天然气的压力, Pa; k 是天然气的绝热指数; β_{cr} 为气体的临界压力比; 下角标“cr”表示与临界状态对应的参数。所以, 通过小孔的泄漏气流只能是临界状态。当然, 随着泄漏过程的不断进行, 天然气的温度和压力都不断降低, 当环境压力与管道内气体压力之比大于临界压比之后, 泄漏口处气流的状态转变为亚音速流。因此, 整个泄漏过程就客观地被分为两个性质不同的阶段, 即在泄漏口处气流为临界状态的临界泄漏阶段和泄漏口处气流为亚音速状态的亚临界泄漏阶段。

3 临界泄漏阶段

在临界泄漏阶段, 环境压力与管道内天然气压力的比值小于临界压比, 即满足式(5)。泄漏口处气流始终处于临界状态, 因此, 在式(4)中

$$c = c_{cr} = \sqrt{\frac{2k}{k+1} RT} \quad (6)$$

$$\dot{m} = A\rho_{cr}c_{cr} = A\phi\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}}\frac{\rho}{RT}\sqrt{\frac{2k}{k+1}RT} \quad (7)$$

式中 ϕ 是速度系数; ρ 是天然气的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。此时, T_e 只能是与临界状态对应的温度 T_{cr} , 管道中天然气的质量 m 可由理想气体状态方程给出。联合 T_e 以及 m , 考虑理想气体的绝热过程方程, 式 (4) 整理化简后有

$$\frac{dT}{T^{3/2}} + (k-1)\phi\frac{A}{V}\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}}\sqrt{\frac{2k}{k+1}}Rd\tau = 0 \quad (8)$$

对式 (8) 积分整理, 得到

$$T = \frac{T_0}{\left[1 + \frac{k-1}{2}\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}}\phi\frac{A}{V}c_0\tau\right]^2} \quad (9)$$

式中 c_0 是泄漏口气流的初始流速, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。式 (9) 给出了天然气泄漏过程中管道内气体的温度随时间的变化情况。而管道内气体的压力则可以代入式 (9) 由理想气体的绝热过程方程求得。因此泄漏管道内的剩余天然气量为

$$m = \frac{\rho V}{RT} = m_0\left[1 + \frac{k-1}{2}\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}}\phi\frac{A}{V}c_0\tau\right]^{\frac{2}{1-k}} \quad (10)$$

其中

$$m_0 = \frac{\rho_0 V}{RT_0}, \quad c_0 = \sqrt{\frac{2k}{k+1}RT_0} \quad (11)$$

下面来确定管道的泄漏速率。将式 (10) 两边对时间求导并进行整理, 即得到管道的泄漏速率

$$\dot{m} = \dot{m}_0\left[1 + \frac{k-1}{2}\frac{\dot{m}_0}{m_0}\tau\right]^{\frac{k+1}{1-k}} \quad (12)$$

其中

$$\dot{m}_0 = m_0\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}}\phi\frac{A}{V}c_0 \quad (13)$$

当然, 该泄漏速率的计算公式只能用于环境压力与管道的压力之比小于临界压比的情况, 也即满足式 (5) 的情况。于是, 式 (12) 适用的泄漏时间为

$$\tau \leq \frac{2}{k-1}\frac{m_0}{\dot{m}_0}\left[\sqrt{\left(\frac{p_0}{p_{sur}}\right)^{\frac{k-1}{k}}\frac{2}{k+1}} - 1\right] \quad (14)$$

可以推得, 从泄漏开始到任意时间 τ 之间的积分平均泄漏速率 \bar{m} ($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$) 为

$$\bar{m} = \frac{1}{\tau}\int_0^\tau \dot{m}d\tau = \frac{m_0}{\tau}\left[1 - \left(1 + \frac{k-1}{2}\frac{\dot{m}_0}{m_0}\tau\right)^{\frac{2}{1-k}}\right] \quad (15)$$

4 亚临界泄漏阶段

当环境压力与管道内的压力之比大于临界压比, 也即当式 (5) 不能得到满足时, 系统就进入了亚临界泄漏阶段。与临界泄漏阶段相比, 最大的区别在于泄漏口处气体的流动状态是亚临界的, 不

满足最大流量条件^[15]。为了确定亚临界阶段的泄漏规律, 必须将式 (1) 改写。此时, 由于

$$c = \sqrt{2(h-h_e)} \quad (16)$$

$$\dot{m} = A\phi\sqrt{\frac{2k}{k-1}\frac{\rho}{V}\left[\left(\frac{p_{sur}}{\rho}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_{sur}}{\rho}\right)^{\frac{k+1}{k}}\right]} =$$

$$A\phi\frac{\rho}{RT}\sqrt{\frac{2k}{k-1}RT\left[\left(\frac{p_{sur}}{\rho}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_{sur}}{\rho}\right)^{\frac{k+1}{k}}\right]} \quad (17)$$

式 (16) 中, h 是天然气气流的比焓, $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。联合式 (2)、式 (3)、式 (16)、式 (17) 以及理想气体状态方程、绝热方程代入式 (1) 进行整理, 得

$$\frac{dp}{d\tau} + kGp_{sur}\left(\frac{p}{p_{sur}}\right)^{\frac{k-1}{k}}\sqrt{\left(\frac{p}{p_{sur}}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1} = 0 \quad (18)$$

其中, G 定义为

$$G = \phi\frac{A}{V}\sqrt{\frac{2k}{k-1}RT_{cr}\left(\frac{p_{sur}}{p_{cr}}\right)^{\frac{k-1}{k}}} \quad (19)$$

对式 (18) 经过变量替换以及积分, 并利用管道刚刚进入亚临界泄漏阶段时应该满足的条件确定积分参数, 注意

$$\tau_{cr} = \frac{2}{k-1}\frac{m_0}{\dot{m}_0}\left[\sqrt{\left(\frac{p_0}{p_{sur}}\right)^{\frac{k-1}{k}}\frac{2}{k+1}} - 1\right] \quad (20)$$

并令

$$\xi = \frac{1}{k-1} - \frac{1}{2} \quad (21)$$

最终可得到

$$(k-1)G(\tau - \tau_{cr}) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{A_n}{n-\xi}\left[\left(\frac{p_{sur}}{p}\right)^{\frac{k-1}{k}(n-\xi)} - \left(\frac{2}{k+1}\right)^{n-\xi}\right] \quad (22)$$

其中

$$A_n = \frac{(2n)!}{2^{2n}(n!)^2}, \quad A_n = \frac{2n-1}{2n}A_{n-1}, \quad A_0 = 1 \quad (23)$$

式 (22) 给出了管道在亚临界泄漏阶段管道内的压力随时间的变化情况。求得压力随时间的变化关系后, 利用过程方程就可以求得温度随时间的变化关系。至此, 联合理想气体状态方程, 并对时间求导, 利用已经求得的 p 、 T 随时间的变化关系以及理想气体绝热过程方程即可求得泄漏速率

$$\dot{m} = -\frac{dm}{d\tau} = -\frac{V}{kRT_{cr}}\left(\frac{p_{cr}}{p_{sur}}\right)^{\frac{k-1}{k}}\left(\frac{p_{sur}}{p}\right)^{\frac{k-1}{k}}\frac{dp}{d\tau} \quad (24)$$

当然, 也可以直接由式 (18) 计算压力随时间的变化关系

$$\frac{dp}{d\tau} = -kGp_{sur}\left(\frac{p}{p_{sur}}\right)^{\frac{k-1}{k}}\sqrt{\left(\frac{p}{p_{sur}}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1} \quad (25)$$

将式 (25) 代入式 (24), 整理后得到

$$\dot{m} = m_{cr} G \left(\frac{p_{sur}}{p_{cr}} \right)^{\frac{1}{k}} \sqrt{\left(\frac{p}{p_{sur}} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1} \quad (26)$$

由式 (26) 可以看出, 此时只需再确定 m_{cr} 、 p_{cr} 以及 T_{cr} , 则可以确定亚临界阶段气体泄漏速率。而 p_{cr} 可由临界状态方程求得, 根据理想气体绝热过程方程求得 T_{cr} , 再利用理想气体状态方程推导出 m_{cr} 。最终有

$$\dot{m} = m_0 \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{1}{k-1}} \left(\frac{p_{sur}}{p_0} \right)^{\frac{1}{k}} G \left(\frac{p_{sur}}{p_{cr}} \right)^{\frac{1}{k}} \sqrt{\left(\frac{p}{p_{sur}} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1} \quad (27)$$

其中

$$G = \phi \frac{A}{V} \sqrt{\frac{2k}{k-1} RT_0 \left(\frac{p_{sur}}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{k}}} \quad (28)$$

5 计算实例

某天然气输送管线管径 $d=295.5$ mm, 管长 $L=1400$ m, 管内初始压力 $p_0=8.8588$ MPa, 气体温度 $T_0=42^\circ\text{C}$; 根据管线内天然气原料气组分计算得到通过该管线的天然气平均分子量 $M=21.22184$, $R=391.78$ J·(kg·°C)⁻¹, 取绝热压缩比 $k=1.3$; 管线所处环境参数依次为: $p_{sur}=101.325$ kPa, $T_{sur}=25.15^\circ\text{C}$ 。另外, 假设该管线的控制阀能够在泄漏事故发生后的第一时间启动并将管道关断。

根据上述方程, 计算了临界泄漏阶段以及亚临界泄漏阶段天然气泄漏相关变量随时间的变化情况, 结果如图 2~图 6 所示。

图 2、图 3 分别给出了在泄漏孔径为 20 mm 时, 管线泄漏速率以及管内压力随时间的变化情况。由图 2 以及计算结果可以看出, 在天然气管线

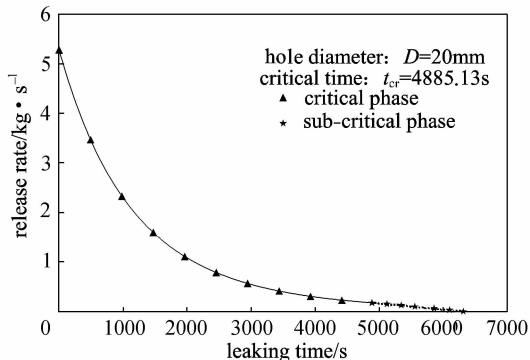


图 2 临界阶段以及亚临界阶段泄漏速率随时间的变化情况

Fig. 2 Release rate changing with time during critical phase and sub-critical phase

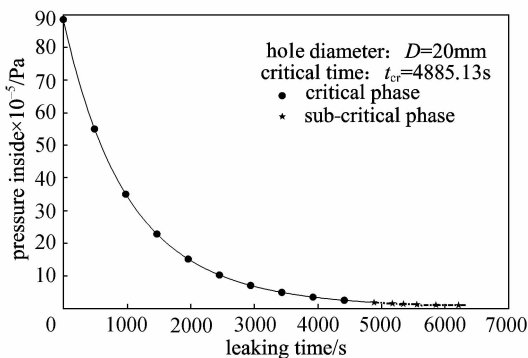


图 3 管内压力随时间的变化情况

Fig. 3 Pressure changing with time during critical phase and sub-critical phase

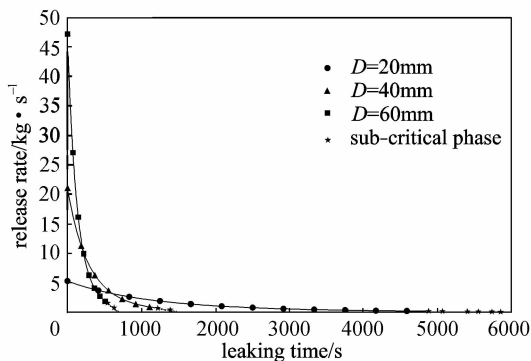


图 4 不同泄漏孔径时气体泄漏速率随时间的变化情况

Fig. 4 Relationship between release rate and hole diameter

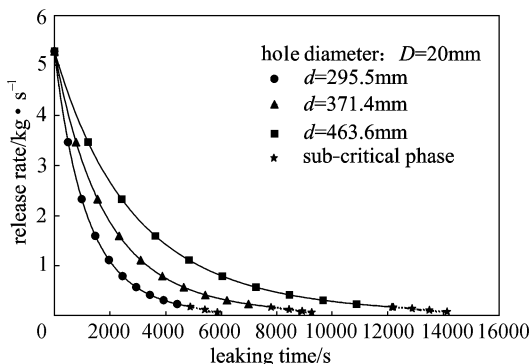


图 5 不同管径时气体泄漏速率随时间的变化情况

Fig. 5 Relationship between release rate and pipeline diameter

发生泄漏的整个过程中, 临界泄漏阶段起主导作用: 随着时间的延长泄漏速率逐渐减小, 到临界阶段结束时, 泄漏速率由初始值 5.286 kg·s⁻¹ 减小到 0.173 kg·s⁻¹; 临界泄漏阶段所持续的时间占整个泄漏阶段持续时间的 $3/4$ 左右。图 3 表明, 随着泄漏的进行, 管内压力越来越小, 当减小到临界

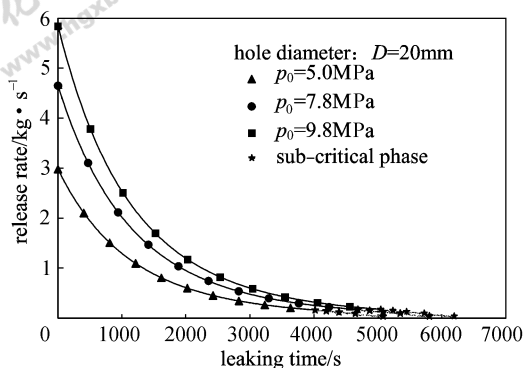


图 6 不同管内初始压力时气体泄漏速率
随时间的变化情况

Fig. 6 Relationship between release
rate and initial pressure

压力值 185.67 kPa 时，进入亚临界泄漏阶段，且压力值继续减小直至管内压力降低到环境压力，此时对应着图 2 的泄漏速率减小为 0，泄漏停止。

图 4 给出了不同泄漏孔径所对应的泄漏速率随时间的变化情况，由图可以看出，孔径越大，初始泄漏速率越大，泄漏速率递减率越大。由式 (13) 可以看出，当其他参数相同，泄漏孔径不同时，初始泄漏率由泄漏孔径决定，即 $\dot{m}_0 \propto d^2$ 。

图 5、图 6 分别给出了不同管径以及不同管内初始压力时泄漏速率随时间的变化情况。由图 5 可以看出，当其他参数相同管径不同时，初始泄漏速率相同，泄漏速率随着时间的变化逐渐减小；管径越大，泄漏速率变化越小，泄漏持续时间越长。由图 6 可以看出，管内初始压力对初始泄漏速率、泄漏速率的变化以及泄漏时间均有一定的影响，初始压力越大，初始泄漏速率越大，泄漏时间越长。

6 结 论

以热力学、气体动力学等为理论基础，假设泄漏管道为刚性容器且泄漏过程绝热，应用理想气体状态方程以及绝热过程方程等，研究分析了天然气管道发生泄漏的两个不同阶段，即临界泄漏阶段以及亚临界泄漏阶段，分别给出了不同阶段时的泄漏速率计算公式，并且给出了相应的实例，讨论分析了不同参数条件下泄漏速率以及随时间的变化情况，得到如下结论。

(1) 发生泄漏后，泄漏速率以及管内压力随着时间的延长逐渐减小，且其变化主要发生在临界阶

段；整个泄漏过程，临界泄漏阶段起主导作用。

(2) 泄漏孔径为影响泄漏速率的主要因素之一，泄漏孔径越大，初始泄漏速率越大，泄漏速率变化越快。

(3) 管线属性参数如管径、管长等，不影响初始泄漏速率，但对整个泄漏阶段的速率变化有一定的影响，管径越大或管长越大，泄漏持续时间越长。

References

- [1] Yang Xianglian (杨向莲). The leakage detection technique of natural gas pipeline and countermeasures. *Energy Technology* (能源技术), 2005, **26** (6): 248-250
- [2] Zhang Wenyan (张文艳), Yao Anlin (姚安林). Study on wind influence of wind on gas diffusion process during gas pipeline leakage emergency. *Natural Gas Industry* (天然气工业), 2006, **26** (12): 150-152
- [3] Xiang Suping (向素平), Feng Liang (冯良), Zhou Yichao (周义超). Leakage model of natural gas pipeline. *Natural Gas Industry* (天然气工业), 2007, **7** (33): 100-102
- [4] Montiel H. Mathematical modeling of accidental gas releases. *Journal of Hazardous Materials*, 1998, **59** (2/3): 211-233
- [5] Arnaldos J, Casal J, Montiel H. Design of a computer tool for the evaluation of the consequences of accidental natural gas releases in distribution pipes. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 1998, **11** (2): 135-148
- [6] Jo Y D, Ahn B J. A simple model for the release rate of hazardous gas from a hole on high-pressure pipelines. *Journal of Hazardous Materials*, 2003, **A97**: 31-46
- [7] Huo Chunyong (霍春勇), Dong Yuhua (董玉华). Estimation of accidental gas release flow rate in long transmission pipelines. *Acta Petrolei Sinica* (石油学报), 2004, **25** (1): 101-105
- [8] Wang Daqing (王大庆), Gao Huilin (高惠临). Analysis of the gas leakage and diffusion and its hazardous areas for natural gas pipeline. *Natural Gas Industry* (天然气工业), 2006, **26** (7): 120-122
- [9] Woodward J L, Mudan K S. Liquid and gas discharge rates through holes in process vessel. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 1991, **4** (4): 161-165
- [10] Pan Xuhai (潘旭海), Jiang Juncheng (蒋军成). Simulated evaluation method and its application in safety and environment assessment. *Industrial Safety and Environmental Protection* (工业安全与环保), 2001, **27**

- (9): 27-31
- [11] Qian Xinming (钱新明), Chen Baozhi (陈宝智). New approach to the uncertainty in quantitative risk assessment; analysis of installation of sensors monitoring release of flammable gas with fuzzy set. *Journal of Northeastern University: Natural Science* (东北大学学报: 自然科学版), 1996, **17** (3): 291-295
- [12] Li Youlü (李又绿), Yao Anlin (姚安林), Li Yongjie (李永杰). Study on diffusion model of gas pipeline leaking. *Natural Gas Industry* (天然气工业), 2004, **24** (8): 102-104
- [13] Yang Zhao (杨昭), Lai Jianbo (赖建波), Han Jinli (韩金丽). Study on hazardous area of hole leakage of gas pipelines. *Natural Gas Industry* (天然气工业), 2006, **26** (11): 156-159
- [14] Cochran T W. Calculate pipeline flow of compressible fluid. *Chemical Engineering*, 1996, **103** (2): 115-122
- [15] Hua Ziqiang (华自强), Zhang Zhongjin (张忠进). *Engineering Thermodynamics* (工程热力学). Beijing: Higher Education Press, 2000