

文章编号: 1673-9469(2012)01-0085-05

## 基于相似理论的燃气泄漏扩散规律研究

许秀梅<sup>1</sup>, 张甫仁<sup>1,2</sup>, 曾小燕<sup>1</sup>

(1. 重庆交通大学 机电与工程学院 重庆 400074; 2. 重庆大学 城市建设与环境工程学院 重庆 400045)

**摘要:** 为得到燃气泄漏扩散规律,更好地减少燃气事故所造成的人员伤亡和损失,据相似理论,建立系统模型并进行模型试验,在获取不同空间点燃气的浓度和采集燃气管道的泄漏速率的基础上,对温度、湿度等多因素耦合作用下的燃气泄漏扩散作了多元回归分析。运用相似准则和量纲分析理论结合多次反复的试验,定量研究确定多因素作用下的燃气泄漏扩散方程并进行验证,为燃气泄漏扩散预测和应急救援提供可靠的理论依据。

**关键词:** 燃气泄漏; 扩散规律; 相似理论; 多元回归分析

中图分类号: TE83

文献标识码: A

### Research on diffusion law of gas leakage basing on similarity theory

ZHANG Fu-ren<sup>1,2</sup>, XU Xiu-mei<sup>1</sup>, ZENG Xiao-yan<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. School of Urban Construction and Environment Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

**Abstract:** In order to reduce the casualties and damage caused by gas leakage, and to get the diffusion law of gas leakage, a system model is constructed and tested based on similarity theory. Multiple regression analysis of the diffusion law of gas leak with temperature, humidity and other factors coupled based on the concentration of different spatial points and the gas leakage rate of gas pipeline have been done. The gas leakage diffusion equation has been established and been verified through the test repeatedly on similarity theory and dimensional analysis. This result of research has a reliable theoretical basis to probable gas leakage prediction and emergency relief measures.

**Key words:** gas leakage; diffusion law; similarity theory; multiple regression analysis

燃气泄漏后的扩散规律早已成为国内外的研究热点。目前国内外在燃气泄漏扩散领域的研究主要是对可燃气体泄漏后,在大气中的扩散及浓度场变化规律的探讨<sup>[1-3]</sup>。对气体泄漏扩散机理研究也较多,提出如典型的 Heavy Gas 模拟模型、唯像模型(B&M Model)、盒子模型(Box Model)、三维 CFD 模型、浅水模型(Shallow layer Model)等<sup>[4-5]</sup>。燃气泄漏问题属于非线性现象,采用数学推理和计算并不能完全解决问题。本文将运用相似理论和量纲分析理论结合多次反复的模型试验,定量研究确定多因素作用下的燃气泄漏扩散

规律。

### 1 量纲分析与相似理论

#### 1.1 量纲分析方法

量纲分析方法是在经验和试验的基础上利用物理定律的量纲齐次原则,以确定各物理量之间的关系<sup>[6]</sup>。

#### 1.2 相似理论

如果现象相似,则两个相似现象的测量参量

收稿日期: 2011-08-07

基金项目: 中国博士后科学基金特别资助(200902290); 重庆市自然科学基金(2008BB6347); 重庆交通大学研究生教育创新基金资助  
作者简介: 许秀梅(1987-),女,重庆人,硕士,从事燃气输配与建筑节能的研究。

所组成的同名  $\pi$  是个定值,其中  $\pi$  称为相似准则。本文采用相似第二定理,回答了如何整理试验结果的问题,即必须将试验结果整理成相似准则之间的关系式,通过这个关系式可以将试验结果推广到任意的相似现象中去<sup>[6-7]</sup>。

## 2 模型试验

### 2.1 试验方案

为了得到燃气在不同环境参数下的扩散规律,需要在模型试验区不断的尝试不同的实验方案:(1) 确定合适的燃气泄漏孔。(2) 确定浓度传感器的布置位置和在线采集方式。(3) 天然气的泄漏速率的大小。(4) 环境参数的确定(温度、湿度、风速、风向)等。

### 2.2 泄漏扩散关系中的相似关系

在这个问题中出现的物理量有  $Q$  - 泄漏点的瞬时泄漏量;  $V$  - 风速;  $\tau$  - 泄漏的时间;  $X$  - 在某一方向上离泄漏点的距离;  $C$  - 该点上燃气的浓度;  $T$  - 温度;  $\varphi$  - 相对湿度。

根据经验,它们之间有关系可用下面的关系式来表示  $C = k \cdot v^a \cdot x^b \cdot Q^c \cdot \tau^d \cdot T^e \cdot \varphi^g$ 。

根据量纲理论,在本实验中变量数  $n = 6$ ,基本量纲  $m = 4$ ,分别为时间  $\tau$ ,温度  $T$ ,长度  $X$  和质量流量  $Q$ ,他们的量纲分别为  $dim\tau = \tau$ ,  $dimT = \theta$ ,  $dimX = L$ ,  $dimQ = M$ ;量纲参数个数为  $n - m = 2$ 。

有量纲分析法有  $f(Q, v, \tau, X, C, T, \varphi) = 0$

则有  $f(a_Q Q, a_v v, a_\tau \tau, a_x X, a_c C, a_T T, a_\varphi \varphi) = 0$

$$a_Q = \frac{1}{Q}, a_\tau = \frac{1}{\tau}, a_x = \frac{1}{X}, a_T = \frac{1}{T}, a_\varphi = \frac{1}{\varphi}$$

此可导出  $a_v = a_x / a_\tau$ ;  $a_c = a_Q \cdot a_x^{-3}$

$$\text{则有 } a_c \cdot c = f(1, 1, 1, 1, \frac{t}{X}, v)$$

$$\frac{x^3}{Q} \cdot c = f(\frac{\tau \cdot v}{x}); c = \frac{Q}{x^3} f(\frac{\tau \cdot v}{x})$$

由于此推导过程忽略了温度和湿度,对其作修正  $c = \frac{Q}{x^3} f(\frac{\tau \cdot v}{x}, T, \varphi)$ 。

此模型具有普遍性,指出了大致的自变量与因变量之间的关系,而指数的具体值需要通过具体的试验数据来确定。

### 2.3 多元回归分析与泄漏扩散方程的确定

1) 多因素耦合作用下泄漏扩散多元回归分析。根据我们构建的实验模型,通过反复的调试实验仪器设计合适的实验方案,用其中的一组统计观测数据来拟合构建线性回归模型,通过拟合效果的优劣来评判拟合回归模型的好坏。

表1给出的是部分试验数据和处理过程,其中  $C$  为甲烷的体积浓度(%),  $Q$  为一定时间内甲烷的体积泄漏量( $m^3/h$ ),  $T$  为甲烷扩散空间域的温度( $^{\circ}C$ ),  $\varphi$  为模型空间内的湿度(%).

表1 实验数据  
Tab. 1 Experiment data

变量序号	$C$	$Q$	$v$	$T$	$\varphi$	$Qv$	$QT$	$Qd$	$Qc$	$vT$	$vd$	$vc$	$Td$	$Tc$	$dc$
1	0.36	0.0416	0.15	3.1	0.96	0.00624	0.129	0.0398	0.01499	0.465	0.1436	0.054	2.967	1.116	0.34452
2	0.43	0.0446	0.13	3.1	0.94	0.00579	0.1381	0.0419	0.01916	0.403	0.1223	0.0559	2.917	1.333	0.40463
3	0.46	0.0484	0.13	3.1	0.93	0.00629	0.1501	0.045	0.02227	0.403	0.1208	0.0598	2.88	1.426	0.42734
4	0.48	0.0504	0.11	5.8	0.9	0.00555	0.2924	0.0453	0.0242	0.638	0.0988	0.0528	5.208	2.784	0.43104
5	0.49	0.0524	0.11	7.6	0.82	0.00577	0.3983	0.0429	0.02568	0.836	0.09	0.0539	6.217	3.724	0.40082
6	0.52	0.0566	0.09	16.5	0.65	0.00509	0.9336	0.0369	0.02942	1.485	0.0588	0.0468	10.77	8.58	0.33956
7	0.53	0.0582	0.08	17.2	0.56	0.00465	1.0006	0.0327	0.03083	1.376	0.045	0.0424	9.666	9.116	0.29786
8	0.55	0.065	0.07	18.7	0.51	0.00455	1.2146	0.0333	0.03572	1.309	0.0359	0.0385	9.593	10.285	0.28215
9	0.57	0.0685	0.05	20.4	0.48	0.00343	1.3974	0.033	0.03905	1.02	0.0241	0.0285	9.833	11.628	0.27474
10	0.62	0.0823	0.05	25.9	0.44	0.00412	2.1321	0.0359	0.05104	1.295	0.0218	0.031	11.29	16.058	0.27032
11	0.66	0.116	0.03	29.8	0.28	0.00348	3.4556	0.0319	0.07653	0.894	0.0083	0.0198	8.195	19.668	0.1815
12	0.68	0.1365	0.03	30.1	0.16	0.00409	4.1081	0.0221	0.09281	0.903	0.0049	0.0204	4.876	20.468	0.11016
13	0.72	0.1429	0.01	38.6	0.15	0.00143	5.5149	0.0216	0.10287	0.386	0.0015	0.0072	5.829	27.792	0.10872
求和	7.07	0.9633	1.04	220	7.78	0.06048	20.865	0.4623	0.56457	11.41	0.7756	0.511	90.25	133.98	3.87336

设构建的四元线性回归模型为  $\hat{C} = a_0 + a_1 Q + a_2 v + a_3 Q + a_4$

从表中数据可知  $k = 4, n = 13, \bar{Q} = 0.074$  性  $0.97, \bar{v} = 0.08, \bar{T} = 16.923, \bar{\varphi} = 0.598$ 。

用最小二乘法估计 其数学方程组为

$$\begin{cases} 7.07 = 13a_0 + 0.963 3a_1 + 1.04a_2 + 220a_3 + 7.78a_4 \\ 0.564 6 = 0.963 3a_0 + 0.086 11a_1 + 0.060 48a_2 + 20.864 9a_3 + 0.462 33a_4 \\ 7.353 = 1.04a_0 + 0.060 48a_1 + 0.106 8a_2 + 11.41a_3 + 0.775 6a_4 \\ 133.98 = 220a_0 + 20.864 9a_1 + 11.41a_2 + 540 9a_3 + 90.248a_4 \\ 3.873 4 = 7.78a_0 + 0.462 33a_1 + 0.775 6a_2 + 90.248a_3 + 5.692 4a_4 \end{cases}$$

借助 Matlab 数学计算软件,可以很方便的计算出解  $a_0 = 0.557; a_1 = 1.615; a_2 = -2.649; a_3 = -0.002, a_4 = 0.167$ 。

三元线性回归模型为  $\hat{C} = 0.557 + 1.615Q - 2.649v - 0.002T + 0.167\varphi$ 。

拟合优度检验如下:

$$R^2 = \frac{\sum (y'_1 - \bar{y})^2}{\sum (y'_1 - \bar{y})^2 + \sum (y_1 - y'_1)^2}$$

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST}$$

$$SSR = \sum (y'_1 - \bar{y})^2 = 0.124 54$$

$$SSE = \sum (y_1 - y'_1)^2 = 0.001 96$$

$$SST = SSR + SSE = \sum (y'_1 - \bar{y})^2 + \sum (y_1 - y'_1)^2 = 0.126 51$$

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = \frac{0.124 54}{0.126 51} = 0.984 468 2$$

$$R = \sqrt{R^2} = \sqrt{0.984 468 2} = 0.992 203 702$$

由上面的分析结果可得如下结论:

$R^2$  越接近于 1,拟合优度越好, $R^2 = 0.988 446 82$ 表明  $C$  值与  $\bar{C}$  偏离的平方和中 有 0.99% 可以通过回归模型来解释,回归模型拟合的效果比较好<sup>[8]</sup>。

$R$  的值接近于 1,说明  $C$  与  $Q, T, \varphi$  之间存在线性相关关系,进而说明本文所构建的实验模型能较好的反应实际情况。

2) 燃气泄漏扩散方程的推导。通过实验数据,求解相似准则方程中的待定系数以确定最终的方程形式,结合量纲和谐原理求解并将试验的结果推广到所有与此相似的现象中去。

本实验主要考虑了以下影响燃气泄漏扩散后的空间浓度分布因素:因子  $Q$  泄漏点的瞬时泄漏

量;  $V$  风速;  $\tau$  泄漏的时间;  $X$  在某一方向上离泄漏点的距离;  $C$  该点上燃气的体积浓度;  $T$  温度;  $\varphi$  相对湿度  $C = f(v, x, Q, \tau, T, \varphi)$ 。

$$\text{即 } C = k \cdot v^a \cdot x^b \cdot Q^c \cdot \tau^d \cdot T^e \cdot \varphi^f$$

其中  $k, a, b, c, d, e, f$  为待定系数,由量纲定理,  $C, T, \varphi, \tau, x$  为无量纲量,其量纲为 1。即  $\dim C = 1, \dim T = 1, \dim \varphi = 1, \dim \tau = 1, \dim x = 1$ 。

由此可作如下推导

$$[C] = K \cdot [v]^a \cdot [x]^b \cdot [Q]^c \cdot [\tau]^d \cdot [T]^e \cdot [\varphi]^f \text{ 即 } [C] = [L \cdot \tau^{-1}]^a \cdot [L]^b \cdot [\tau]^d \cdot [L^3 \tau^{-1}]^c \cdot [T]^e \cdot [\varphi]^f [C] = [L]^{a+b+3c} \cdot [\tau]^{d-a-c} \cdot [T]^e \cdot [\varphi]^f$$

$$\text{即 } a + b + 3c = 0, d - a - c = 0$$

$$\text{令 } a = a, b = b$$

$$\text{则 } c = -\frac{a+b}{3}, d = a + c = \frac{2a-b}{3}$$

$$\text{代入上式则有 } C = k \cdot v^a \cdot x^b \cdot Q^{-\frac{a+b}{3}} \cdot \tau^{\frac{2a-b}{3}} \cdot T^e \cdot \varphi^f$$

此方程中的自变量与因变量之间是典型的非线性关系,为了方便数据处理,首先对方程进行线性化。上式两边同取对数得

$$\ln C = \ln K + a \ln v + b \ln x + \left(-\frac{a+b}{3}\right) \ln Q + \frac{2a-b}{3} \ln \tau + e \ln T + f \ln \varphi$$

式中有五个未知数  $k, a, b, e, f$ ,需要用五组试验数据建立守恒的方程组,即可求得其具体的值。

以浓度传感器 B 和浓度传感器 C 在三次不同实验条件下测量数据来求解  $k, a, b, e, f$ 。试验条件下的测试数据和环境条件描述如下:

环境条件  $v = 0.09 \text{ m/s}, T = 16.5 \text{ }^\circ\text{C}, \varphi = 0.653$ 。

测试数据  $\bar{Q} = 0.056 58, \bar{C}_B = 0.369 33, \bar{C}_C = 0.172 961$ 。

此处的时间变量已经包括在燃气的泄漏量和浓度的变化过程中,因此,在进行试验时,取燃气的泄漏时间都为 1 min,其中浓度传感器 B 距离泄漏源的距离为 0.6 m,浓度传感器 C 距离泄漏源的距离为 1.2 m。

将上述数据代入式子可得如下方程组

$$\begin{cases} \ln 0.36933 = \ln K + a \ln 0.09 + b \ln 0.6 + \left(-\frac{a+b}{3}\right) \ln 0.05658 + \left(\frac{2a-b}{3}\right) \ln \frac{1}{60} + e \ln 16.5 + f \ln 0.653 \\ \ln 0.11422 = \ln K + a \ln 0.09 + b \ln 1.2 + \left(-\frac{a+b}{3}\right) \ln 0.05658 + \left(\frac{2a-b}{3}\right) \ln \frac{1}{60} + e \ln 16.5 + f \ln 0.653 \\ \ln 0.311819 = \ln K + a \ln 0.11 + b \ln 0.6 + \left(-\frac{a+b}{3}\right) \ln 0.0524125 + \left(\frac{2a-b}{3}\right) \ln \frac{1}{60} + e \ln 7.6 + f \ln 0.818 \\ \ln 0.3085591 = \ln K + a \ln 0.11 + b \ln 0.6 + \left(-\frac{a+b}{3}\right) \ln 0.0504125 + \left(\frac{2a-b}{3}\right) \ln \frac{1}{60} + e \ln 5.8 + f \ln 0.898 \\ \ln 0.27168713 = \ln K + a \ln 0.13 + b \ln 0.6 + \left(-\frac{a+b}{3}\right) \ln 0.0484125 + \left(\frac{2a-b}{3}\right) \ln \frac{1}{60} + e \ln 3.1 + f \ln 0.927 \end{cases}$$

$$\ln \frac{0.369633}{0.11422} = b \ln \frac{0.6}{1.2} \Rightarrow b = -2.1774$$

$$\begin{cases} \ln \frac{0.369333}{0.311819} = a \ln \frac{0.09}{0.11} + \left(-\frac{a+b}{3}\right) \ln \frac{0.05658}{0.0524125} + e \ln \frac{16.5}{7.6} + f \ln \frac{0.653}{0.818} \Rightarrow \\ \ln \frac{0.311819}{0.3085591} = a \ln \frac{0.11}{0.11} + \left(-\frac{a+b}{3}\right) \ln \frac{0.0524125}{0.0504125} + e \ln \frac{7.6}{5.8} + f \ln \frac{0.818}{0.898} \\ \ln \frac{0.311819}{0.27168713} = a \ln \frac{0.11}{0.13} + \left(-\frac{a+b}{3}\right) \ln \frac{0.0504125}{0.0484125} + e \ln \frac{5.8}{3.1} + f \ln \frac{0.898}{0.927} \\ \begin{cases} 0.16274966 = -0.200671a + 0.775212e - 0.22529f \\ 0.01050951 = 0.27029e - 0.0933077f \\ 0.12726225 = -0.1670541a + 0.626456e - 0.0636333f \end{cases} \end{cases}$$

用 Matlab 解上面的方程组得<sup>[9]</sup>

$$c = -\frac{a+b}{3} = \frac{0.8224 + 2.1774}{3} = 0.9999$$

$$d = a + c = 0.999 - 0.8224 = 0.1776$$

将所有的数据代入方程式得  $k = 0.60027$ 。

天然气在试验空间的泄漏扩散方程为

$$C = 0.6003 Q \frac{\tau^{0.1776} T^{0.0175}}{\varphi^{0.0638} v^{0.5226} x^{2.1774}}$$

3) 燃气泄漏扩散方程的验证。

环境条件  $v = 0.15 \text{ m/s}$ ,  $T = 3.1^\circ\text{C}$ ,  $\varphi = 0.857$ 。

测试数据  $\bar{Q} = 0.041625$ ,  $\bar{C}_B = 0.04216$ ,  $x = 1.2 \text{ m}$ 。

将上述数据代入燃气泄漏扩散方程得

$$C = 0.60027 \frac{0.041625 \cdot \left(\frac{1}{60}\right)^{0.1776} \cdot (3.1)^{0.0175}}{(0.15)^{0.8224} \cdot (1.2)^{2.1776} \cdot (0.957)^{0.0638}} =$$

$$0.03953$$

相对误差大小可由下面公式进行计算

$$\delta = \frac{\Delta C}{C} 100\% = \left| \frac{C - \bar{C}}{\bar{C}} \right| 100\%$$

$$\delta = \left| \frac{0.03953 - 0.04216}{0.04216} \right| 100\% = 6.2\%$$

误差偏大,但对于其他的实验采集数据此误差在可接受范围内。

### 3 结论

1) 多元回归拟合的效果比较好,且本文所构建的试验模型能较好的反映实际情况。

2) 基于量纲分析方法和相似理论,结合实验数据,获得燃气泄漏扩散方程,结果表明该数学模型误差较小,经验公式可在实验室模型试验中加以推广。

参考文献:

- [1] 丁信伟,王淑兰,徐国庆.可燃及毒性气体泄漏扩散研究综述[J].安全与环境学报,2003,3(3):1-2.
- [2] 吴晋湘,张丽娟,刘丽辉,等.室内可燃气体泄漏后浓度场变化的实验研究[J].消防科学与技术,2005,24(2):169-171.
- [3] QIANXM, CHENLS, FENGCG. Simulation analysis of indoor gas explosion damage[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2003, 12(3): 286-287.
- [4] ENGLUND G, HAMBACK PA. Scale dependence of emigration rates[J]. Ecology, 2004: 85.
- [5] SMITH JA, DEITSCH JJ. Distributed-rate model configured in series to simulate sorption of organic pollutants to natural soil[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology 2004: 72.

- [6] 杨俊杰. 相似理论与结构模型试验 [M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2005.
- [7] 王文庆, 佟明安. 基于模糊逻辑系统的复杂相似系统分散全息控制设计 [J]. 系统工程理论与实践, 2003, 23(8): 67-69.
- [8] 邵辉, 施志荣. 示踪技术用于气体泄漏扩散模拟的多元线性回归分析 [J]. 安全与环境学报, 2006, 16(4): 112-114.
- [9] 石博强. MATLAB 数学计算范例教程 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 2004.

(责任编辑 刘存英)

(上接第76页) 因具多, 生油母质丰富质优。作为碳酸盐岩有机质含量指标之一的有机碳含量和氯仿沥青 A 含量相对较低。

2) 促使碳酸盐岩有机质生烃的作用很多, 如胶结、重结晶、压溶、晶析等作用。尤其是晶析和压溶作用。

#### 参考文献:

- [1] 刘德汉, 史继扬. 高演化碳酸盐烃源岩非常规评价方法探讨 [J]. 石油勘探与开发, 1994, 21(3): 113-114.
- [2] 钟宁宁, 张枝焕. 石油地球化学进展 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1998.
- [3] 付家澳, 贾蓉芬, 刘德汉, 等. 碳酸盐岩有机地球化学 - 在石油、天然气、煤和层控矿床成因及评价中的应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [4] 范嘉松, 李菊英, 赵生才. 论古代海洋碳酸盐沉积环境基本模式 [J]. 地质科学, 1979(4): 288.
- [5] 陈义才, 沈忠民, 李延军, 等. 过成熟碳酸盐烃源岩有机碳含量下限值探讨 [J]. 石油实验地质, 2002, 24(5): 428.
- [6] 秦建中, 刘宝泉, 国建英, 等. 关于碳酸盐烃源岩的评价标准 [J]. 石油实验地质, 2004, 26(3): 281-284.
- [7] HUNT J M. Petroleum geochemistry and geology [M]. New York: Freeman, 1979.
- [8] 夏新宇, 戴金星. 碳酸盐岩生烃指标及生烃量评价的新认识 [J]. 石油学报, 2000, 21(4): 36-37.
- [9] GEHMAN H M. Organic matter lime stones [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2000, 26: 885-897.
- [10] HUNT J M. Distribution of hydrocarbons in sedimentary rocks [J]. Geochim. Cosmochim. Acta, 1961, 22: 37-49.
- [11] 周天驹, 黄醒汉. 碳酸盐岩生油问题的探讨 [J]. 华东石油学院学报, 2006(3): 154-155.
- [12] 成都地院石油系有机地化室. 有机地球化学概述 [J]. 国外地质, 1976(3): 5-12.
- [13] 陈荣书. 关于碳酸盐源岩研究的两个问题 [J]. 地质科技情报, 1993, 12(2): 87-88.
- [14] 柳广弟, 高岗, 王晖. 碳酸盐烃源岩有机质分布与排烃特征 [J]. 沉积学报, 1999, 17(3): 484-485.

(责任编辑 刘存英)