

室内泄漏燃气浓度分布的一个量级估算方法

陈 力¹⁾ 李德聪 丁雁生

(中国科学院力学研究所工程科学部, 北京 100190)

摘要 在对室内液化石油气泄漏流动过程进行量级估算分析的基础上, 提出了一种预测室内泄漏液化石油气浓度分布的简化方法. 并结合一次居民室内液化气爆炸事故, 讨论了此方法在实际应用中的简易可行性.

关键词 燃气浓度分布, 量级估算方法, 液化石油气, 非均布燃气爆炸

A MAGNITUDE ORDER ESTIMATION METHOD FOR FORECASTING CONCENTRATION DISTRIBUTION OF INDOOR EXPLOSION GAS

CHEN Li¹⁾ LI Decong DING Yansheng

(Division of Engineering Science, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract In this paper, by analyzing the order of magnitude, the flow process of the leaking LPG is simplified into three independent sub-processes, including the process of LPG sedimentation to floor; spreading to other room and diffusing to roof, then a simplified method for forecasting concentration distribution of indoor explosion gas is put forward. The feasibility and simplicity of this method are discussed by applying it to analyzing an actual LPG explosion hazard.

Key words gas concentration distribution, magnitude order estimation method, liquefied petroleum gas (LPG), non-homogeneous gas explosion

引 言

随着城乡建设的发展, 燃气(特别是液化石油气)已广泛用于居民日常生活. 这对于提高经济效益、减少大气污染、方便居民生活等方面都带来了好处. 但另一方面, 由于燃气装置的老化、失修以及居民使用不当等情况, 室内燃气爆炸事故时有发生, 由此造成的房屋倒塌、人员伤亡, 以及火灾、中毒等灾害, 严重地影响了居民的正常生活^[1,2].

液化石油气(LPG)是从石油的开采、裂解、炼制等生产过程中得到的副产品, 是碳氢化合物的混合物, 一般简称为液化气. 其主要成分包括: 丙烷、丙烯、丁烷、丁烯和丁二烯, 同时还含有少量的甲烷、乙烷、戊烷, 以及臭味剂硫化氢等成分. LPG的气态密度为空气的 1.2~2.0 倍, 体积浓度爆炸极限为 1.8%~9.5%, 最小点火能量约为 0.3 mJ, 极易引起燃烧和爆炸.

目前对燃气爆炸事故鉴定的方法还不够完善.

大部分鉴定方法都是基于对房屋损坏程度以及人员伤亡级别进行评价^[3,4], 而对室内燃气泄漏的力学过程缺乏必要的了解, 使得对燃气爆炸事故的鉴定不够全面, 责任认定难. 因此, 对室内燃气泄漏的力学过程的充分了解是完整鉴定一起燃气爆炸事故必不可少的基础.

本文应用量级估算的方法, 分析了室内泄漏燃气流动的力学过程. 提出了一种估计室内泄漏液化石油气浓度分布的简化方法, 并结合一次居民室内液化气爆炸事故, 举例说明了该方法在实际中的应用.

1 室内泄漏液化气的流动过程

一般说来, 居民室内液化气从气源泄漏到最后发生爆炸, 大致要经历如下 3 个力学过程: (1) 液化气从气源泄出后向地面的沉降过程; (2) 液化气沿地面向各个房间的蔓延过程; (3) 液化气自地面向上的扩散过程. 当扩散的石油液化气浓度达到其爆炸极限范围内时, 遇到明火花, 便会引发燃烧爆炸事

2007-09-20 收到第 1 稿, 2008-03-27 收到修改稿.

1) E-mail: chenli@imech.ac.cn

故. 为获取泄漏液化气浓度随时间变化的空间分布特征, 下文将对上述的 3 个力学过程做量级估算.

1.1 液化石油气在重力和浮力作用下的沉降运动

自液化气从气源泄出即开始与空气混合, 其初始浓度记作 C_0 . 混合气体密度 $\rho_0 = C_0\rho_{LPG} + (1 - C_0)\rho_{AIR}$, 式中液化气密度为 ρ_{LPG} , 空气密度记作 ρ_{AIR} . 如果记重力加速度为 g , 那么浓度为 C_0 的混合气团的沉降加速度 a 可写为

$$a = C_0 \left(1 - \frac{\rho_{AIR}}{\rho_{LPG}} \right) g / \left[C_0 + (1 - C_0) \frac{\rho_{AIR}}{\rho_{LPG}} \right]$$

忽略垂向初速度, 设泄气源到地面高度记作 h_s , 则沉降特征时间 $(\Delta t)_1$ 为

$$(\Delta t)_1 = \sqrt{\frac{2h_s}{a}} = \left[2h_s / \frac{C_0 \left(1 - \frac{\rho_{AIR}}{\rho_{LPG}} \right) g}{C_0 + (1 - C_0) \frac{\rho_{AIR}}{\rho_{LPG}}} \right]^{1/2} \quad (1)$$

依照式 (1) 估计不同初始浓度气团的沉降时间 $(\Delta t)_1$, 如图 1 所示. 这里, 我们已知液化气的密度与空气密度之比 $k = \rho_{LPG}/\rho_{AIR}$ 为 1.2~2.0; 泄气源到地面高度 h_s 的量级 $O(h_s) = 1\text{m}$. 从图 1 可以看出, 混合气团的沉降时间 $(\Delta t)_1$ 为 1s 量级.

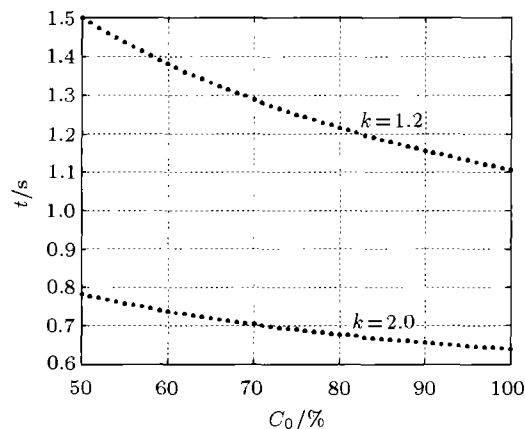


图 1 不同浓度气团的沉降时间曲线

1.2 液化气沿地板向各个房间的流动过程

经历约 1s 后, 泄漏的液化气沉降到地面. 由于其密度比空气大, 它将在浮力和重力驱动下沿地面向各个房间流动, 结果在整户住宅地面沉积了一层液化气. 由于其流速较小, 估算时可忽略其在流动过程中所受的阻力. 如果设落地时气团初始水平速度为零, 根据能量守恒定律, 其运动速度可用下式估计

$$\frac{1}{2}V^2 + ah = ah_0 \quad (2)$$

式中 V 为 t 时刻气团水平流速, h 为 t 时刻该气团的高程, a 为沉降加速度, h_0 为气团落地的初始高程. 于是

$$V = \left[2 \frac{C_0 \left(1 - \frac{\rho_{AIR}}{\rho_{LPG}} \right) g (h_0 - h)}{C_0 + (1 - C_0) \frac{\rho_{AIR}}{\rho_{LPG}}} \right]^{1/2} \quad (3)$$

在重力驱动下, 地表液化气的高度将趋于水平. 液化气上表面达到不同的水平程度, 需要不同的时间. 一般住宅净高约 3m, 液化气沿地面的流程约十几米, 可以认为 $h_0 - h \approx 1\text{cm}$ 时, 液化气上表面已经足够平了. 据式 (3) 可估算出不同初始浓度的液化气团沿地表蔓延速度, 结果如图 2 所示.

从图 2 可见, 液化气团的蔓延速度约为 0.3m/s. 如果按照 1cm 的平衡程度来估算, 蔓延 10m 需 30~40s, 蔓延 20m 需 70~80s. 故在一般住宅中, 液化石油气从开始流动到上表面平衡的特征时间 $(\Delta t)_2$ 为 1min 量级.

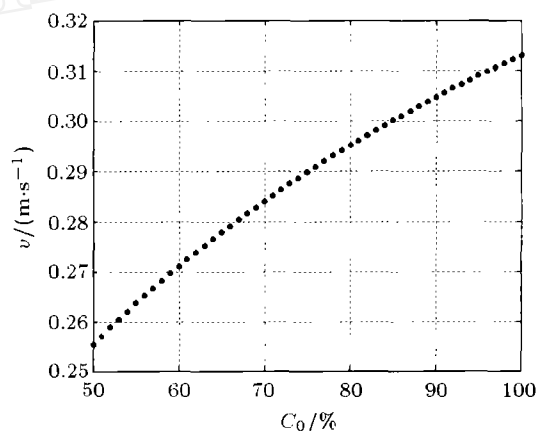


图 2 不同浓度气团的蔓延速度曲线

1.3 液化气由地面向上的扩散过程

由于气体分子热运动和室内的微弱对流, 液化气将由浓度高的地方向浓度低的地方扩散, 在住宅内即体现为自下而上的扩散过程.

从前两节我们知道: 液化气从气源流出沉降到地面, 时间以秒计; 从泄漏源处地面向其它房间蔓延, 时间以分钟计. 然而, 由地面向上扩散, 则以若干小时计. 扩散的特征时间远大于其沉降及蔓延的特征时间, 所以可认为液化气发生扩散时, 已经铺满了该住宅的地板, 从而可简化为沿垂直方向的一维扩散问题.

在一维扩散模型中, 考虑气源的泄漏过程, 将液化气沿地板的蔓延简化为地板表面的气源 m_{LPG} . 则液化石油气自下而上的扩散过程可近似用方程 (4)

来描写.

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} &= D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}, \quad 0 \leq z \leq H \\ C(z, 0) &= 0, \quad 0 \leq z \leq H \\ \frac{\partial C}{\partial z} \Big|_{z=H} &= 0 \\ \int_0^H C(z, t) dz &= \int_0^t \frac{1}{\rho A} \dot{m}_{\text{LPG}} dt \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

这里 C 为 LPG 的浓度, D 为 LPG 的扩散系数. $z=0$ 表示地面, H 为屋顶高度, ρ 为 LPG 的密度, A 为地板总面积, \dot{m}_{LPG} 表示泄露的质量速度.

取特征长度 H 和特征时间 $t_c = H^2/D$, 将方程 (4) 无量纲化. 此时, $\tau = t/t_c$ 表示无量纲时间; $x = z/H$ 表示无量纲高度. 并假设气源泄露速度为常数, 即 $\dot{m}_{\text{LPG}} = \text{const.}$ 则方程 (4) 可化为如下的无量纲形式

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial \tau} &= \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad 0 \leq x \leq 1 \\ C(x, 0) &= 0, \quad 0 \leq x \leq 1 \\ \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{x=1} &= 0 \\ \int_0^1 C(x, \tau) dx &= \frac{H}{\rho AD} \dot{m}_{\text{LPG}} \cdot \tau \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

在密闭绝热环境下, LPG 的扩散系数为 $10^{-5} \text{m}^2/\text{s}$ 的量级. 一般住宅的屋顶高度约为 3.0m , 这样特征时间 $t_c = H^2/D$ 约为 10d . 然而实际情况中居民室内不是完全密闭绝热的, 存在着一定的温度分布, 这样室内就会有微弱的对流, 使得扩散过程加剧, 从而加速了液化气浓度分布的均匀化. 具体计算时, 我们可将对流的影响折算进扩散系数当中, 定义成等效扩散系数 D_{eff} . 等效扩散系数的量级 $O(D_{\text{eff}}) \sim L \cdot V^{[5]}$. 这里 L 表示对流的尺度, 就居民室内而言, 应为 m 量级; V 表示对流的速度, 据稳态对流的能量方程 $\mathbf{V} \cdot \nabla T' = \chi \Delta T'^{[6]}$, 我们可估算出 V 的量级. 一般居民室内的温度梯度约为 $0.2^\circ\text{C}/\text{m}$, 这样就可以估算出 $O(V) \sim 10^{-4} \text{m}/\text{s}$, 于是等效扩散系数的量级 $O(D_{\text{eff}})$ 为 $10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$, 实际的特征时间 t_c 约为十几小时.

2 估计室内泄漏液化气浓度分布的简化方法

从前面分析可知: 液化气从气源泄出即开始与空气混合, 由于其密度比空气大, 在重力的作用下向地面沉降, 需要的时间为 1s 量级; 其后在浮力和重

力驱动下沿地面向各个房间流动, 在地面沉积为一薄层气, 需要的时间为 1min 量级; 然后高浓度的液化气自地面向屋顶方向扩散, 扩散过程的特征时间为十几小时量级. 经过这 3 个力学过程, 室内液化气便形成了一定的浓度分布. 当室内某位置的液化气浓度达到其爆炸极限范围内, 并在该处遇到适当的火源, 便会引起燃烧爆炸. 因此在实际事故中, 辨识燃气爆炸源、分析燃气爆炸灾害, 就需要了解爆炸燃气在室内的浓度分布.

液化气的扩散过程与其沉降和蔓延过程相比缓慢的多, 所以我们对实际事故分析, 便可把计算室内燃气分布的问题简化为垂直方向的一维扩散问题, 并将泄漏过程简化为地板表面的边界条件项, 这样室内燃气浓度的分布问题便可由方程 (5) 描述.

在实际事故中, 根据具体情况合理选取 \dot{m}_{LPG} , 通过求解方程 (5), 便可得到室内泄漏燃气浓度的分布.

3 实例分析

结合一起居民室内液化气爆炸事故, 说明上述简化方法在实际事故中的应用.

该户厨房装有液化气管道及灶具, 并备有 15kg 规格用剩的液化气瓶. 两种渠道所供的液化气性质相同, 密度为空气的 1.84 倍, 爆炸浓度上下限分别为 9.5% 和 1.8% . 该户住宅面积约 90m^2 , 室内净高 2.78m , 从厨房到其它地方的最大距离为 16m . 事故发生于北方冬天, 门窗关闭. 由于管道意外停气, 事主使用瓶装液化气做早饭后离家, 其他家人约 4h 后起床离家, 此时未闻到臭味, 随后管道恢复供气. 14h 后, 事主晚上回家闻到臭味, 开灯开窗, 随后发生爆炸和火灾, 造成严重的事故. 如果泄漏源是气瓶, 最多可泄漏液化气 15kg , 但真实的泄漏速度 \dot{m}_{LPG} 未知; 如果泄漏源是管道, 泄漏时间约为 10h , 事故后对管道的泄漏速度进行了测量, 发现泄漏速度基本恒定, 为 $9.54 \text{kg}/\text{h}$, 这样就可泄漏出约 95.4kg 液化气. 事故鉴定的一个重点便是辨别引起事故的燃气泄漏源.

3.1 瓶装液化气泄漏时的算例

从前面的事故描述中, 我们注意到一个细节: 其他家人约 4h 后起床离家时未闻到臭味. 我们知道, 人的嗅知限为燃气爆炸下限的 20% (《城镇燃气设计规范》GB50028-93). 此细节说明, 如果是瓶装液化气发生泄漏, 在事主离家 4h 后, 泄漏燃气的浓度在离地面 0.5m 处还未达到 0.36% (燃气爆炸下限浓度的 20%). 如果假设恰好能闻到臭味, 以此来估计 \dot{m}_{LPG} , 得到的是此种泄漏情况下 \dot{m}_{LPG} 的上限.

该户屋顶高度 H 为 2.78 m, 取等效的扩散系数 $D_{\text{eff}} = 10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$, 这样该扩散问题的特征时间 $t_c = \frac{H^2}{D_{\text{eff}}} = 21.5 \text{h}$. 在此条件下, 求解方程 (5), 可得此种情况下的泄漏速度 \dot{m}_{LPG} 为 $6.56 \times 10^{-5} \text{kg/s}$. 如果实际事故中是按此速度泄漏, 通过求解方程 (5), 可算得经历 14 h 后室内液化气浓度的分布, 结果见图 3. 方程 (5) 本为无量纲形式, 为了便于参看, 图 3 采用了有量纲的形式表述. 从中可以看出, 液化气靠近地面处浓度高、梯度最大, 而靠近房顶浓度低、梯度趋向零, 这是由方程的性质及边界条件决定的; 最高浓度位于地面但仅为 1.1%, 低于液化气的爆炸下限浓度 1.8%, 这表明在此种泄露情况下该户不可能发生爆炸事故.

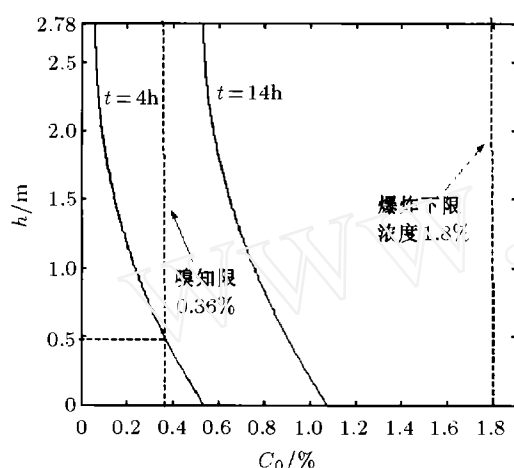


图 3 不同时刻的燃气浓度分布曲线

3.2 管道液化气的泄漏算例

如果是管道液化气泄漏时, 其泄漏速度基本是恒定的, $\dot{m}_{\text{LPG}} = 9.54 \text{kg/h}$, 泄露时间为 10 h. 在此情况下, 求解方程 (5), 可得泄露 10 h 后室内液化气浓度的分布, 结果如图 4 所示.

从图 4 中, 可以看出: 液化气浓度分布曲线的形态与算例 1 相似, 也是靠近地面处浓度高、梯度最大, 而靠近房顶浓度低、梯度趋向零; 但浓度却要高的多, 从地面到屋顶的浓度都超过爆炸上限. 其平均浓度为 16%, 也显著高于爆炸上限 9.5%. 事主回家后开窗通风, 室内风流带的燃气浓度将进入爆炸限, 遇火源便引起了爆炸; 而风流带外的燃气浓度高于爆炸限, 成为爆炸后的纵火源. 这些与实际爆炸现场的情况是相符的.

通过上述两个算例便可帮助我们鉴别出该户燃气爆炸的泄漏源为管道而非气瓶, 明确了引起事故的燃气泄露源, 为事故的分析提供了必要的依据.

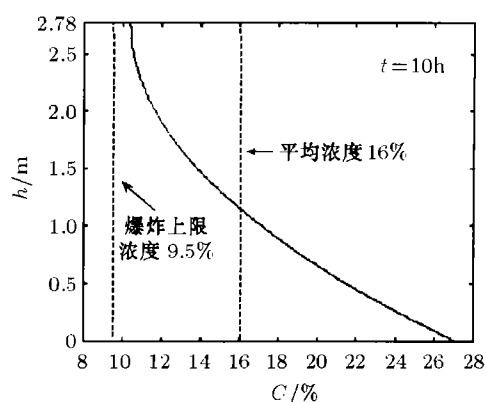


图 4 $t = 10 \text{h}$ 时燃气浓度分布曲线

4 结 论

(1) 室内液化气从泄漏到发生爆炸事故, 要经历沉降、蔓延和扩散 3 个力学过程. 其中沉降的特征时间为秒量级, 蔓延的特征时间为分钟量级, 扩散的特征时间为若干小时量级. 通过求解一维扩散方程 (5) 便可确定室内液化气浓度的分布.

(2) 室内液化气靠近地面浓度高、梯度最大; 靠近房顶浓度低、梯度趋向零, 这是由方程本身的性质及边界条件决定的.

(3) 对室内液化气泄漏流动物理过程的必要了解是做好一起全面事故鉴定的必不可少的基础, 本文介绍的简化方法将有助于深入了解室内液化气的泄漏流动的力学过程.

参 考 文 献

- 郭文军, 江见鲸. 城市燃气爆炸事故及其防治对策. 煤气与热力, 1998, 18(3): 41~43 (Guo Wenjun, Jiang Jianjing. Urban gas explosion hazards analysis and prevention. *Gas and Heat*, 1998, 18(3): 41~43(in Chinese))
- Rasbash DJ. Review of explosion and fire hazard of liquefied petroleum gas. *Fire Safety Journal*, 1980, 2(4): 223~236
- 崔士起, 石磊, 刘延廷. 某住宅燃气爆炸后鉴定处理. 四川建筑科学研究, 2004, 30(4): 62~63,67 (Cui Shiqi, Shi Lei, Liu Yanting. Assessment of a gas explosion accident in a building. *Sichuan Building Science*, 2004, 30(4): 62~63,67(in Chinese))
- 李宁, 王罡, 李荣. 某高层住宅楼地下室燃气爆炸事故结构鉴定分析. 工业建筑, 1997, 27(1): 1~5 (Li Ning, Wang Gang, Li Rong. Structure assessment of a gas explosion accident in the basement of a high building. *Industrial Construction*, 1997, 27(1): 1~5(in Chinese))
- Landau LD, Lifshitz EM. *Statistical Physics* (volume 5). Butterworth-Heinemann. 1999
- Landau LD, Lifshitz EM. *Fluid Mechanics* (volume 6). Butterworth-Heinemann. 1999