

doi:10.3969/j.issn.1671-5152.2024.10.007

# 户内燃气系统微泄漏动态扩散下的安全性

汪贤文<sup>1</sup>, 焦文玲<sup>2, 3</sup>, 刘天杰<sup>2, 3, 4</sup>, 田兴浩<sup>2, 3</sup>, 周起能<sup>1</sup>

1.芜湖泰和管业股份有限公司; 2.哈尔滨工业大学建筑与设计学院;

3.寒地城乡人居环境科学与技术工业和信息化部重点实验室; 4.深圳市燃气集团股份有限公司

**摘 要:** 居民户内燃气事故一直是社会、业内和学者关注的焦点。户内低压燃气系统的泄漏检测理论与技术体系急需研究。本文通过分析户内燃气系统的微小泄漏情况, 给出了户内燃气系统安全微漏率的定义; 根据此定义, 引入小孔泄漏模型进行静态泄漏计算, 初步量化了安全微漏率的数值; 在此基础上, 我们采用数值模拟的方法, 建立了一份具有代表性的小户型建筑模型, 在静态计算结果中选取多个泄漏量, 通过Fluent对微小泄漏的扩散进行动态模拟, 考虑房间的自然渗透作用, 探讨最不利条件下户内燃气系统的最大允许泄漏率, 即安全微漏率不应高于 $3 \times 10^{-7} \text{kg/s}$ 。

**关 键 词:** 户内燃气系统; 微小泄漏; 安全微漏率; 扩散; 浓度分布

## 1 概述

居民户内燃气事故一直是社会、业内和学者关注的焦点。户内燃气事故很多与燃具连接管、户内燃气输送管路、阀门、表具及燃具有关<sup>[1]</sup>。近年来, 相关领域的研究涵盖户内燃气泄漏扩散模拟及事故伤害后果、

户内燃气安全评价及燃气泄漏检测等诸多方面<sup>[2] [3]</sup>, 但这些均是针对燃气空气混合物达到爆炸浓度极限范围内的户内燃气泄漏场景研究。而虽然存在极微小泄漏, 但不会达到户内燃气爆炸浓度条件的泄漏率界限值是多少呢? 这如同燃气管材气密性检测采用的充气浸水法也存在泄漏量检测的下限<sup>[4]</sup>问题, 即必须检测

[5] 国家市场监督管理总局缺陷产品召回技术中心. 广东深圳市东震实业有限公司召回部分大鼻子牌家用可燃气体探测器[N/OL]. 国家市场监督管理总局缺陷产品管理中心网站. 2023-09-05[2023-09-05]. [https://www.dpac.org.cn/xfpzh/xfpgnzh/202309/t20230907\\_109945.html](https://www.dpac.org.cn/xfpzh/xfpgnzh/202309/t20230907_109945.html).

[6] 国家市场监督管理总局. 2023民生领域案件查办“铁拳”行动典型案例(第一批) [N/OL]. 国家市场监督管理总局网站. 2023-04-20[2023-04-20]. <https://www.>

[samr.gov.cn/xw/zj/art/2023/art\\_f03a70bdcac44c5ba025a31b22c71ab6.html](http://samr.gov.cn/xw/zj/art/2023/art_f03a70bdcac44c5ba025a31b22c71ab6.html).

[7] 孔祥朋, 鞠彬彬, 畅通, 等. 家用可燃气体探测器性能失效分析与改进[J]. 中国标准化, 2023 ( 19 ): 211-215.

[8] 顾苏炼. 《安全生产法》第36条第四款具体落实的讨论[J]. 煤气与热力, 2023, 43 ( 04 ): 43-46. DOI:10.13608/j.cnki.1000-4416.2023.04.13.

到的最小泄漏量/率是多少,才能保证材料的气密性以及燃气户内系统是安全的。

极其微小的燃气泄漏或者排放在很多场合都存在,因为量小、时间短,存在通风换气等而不易被察觉和注意,比如,更换连接胶管的瞬间、连接管上极小的裂纹等。在密封十分严格的建筑内,这种燃气泄漏可能也是有危险的,特别是持续时间很长时,比如密封性非常好的高层建筑等。目前,与微小燃气泄漏相关的量化研究与探讨几乎空白<sup>[5]</sup>,本文通过户内燃气系统微小泄漏量的计算与分析,重点探讨泄漏率与安全性的关系,提出户内燃气系统安全微漏率的概念,并给出明确的定义。在此基础上,结合静态模型计算和动态扩散仿真两种手段,科学量化安全微漏率的具体数值。安全微漏率量化研究对制定燃气泄漏检测标准及长久空置房屋的燃气设施监管有十分重要的意义。

## 2 户内燃气管路系统安全微漏率

### 2.1 安全微漏率定义

正常情况下燃气管道检验合格、规范施工,管材本身不会存在使气体泄漏的孔隙,但由于户内燃气管路系统中大量连接点的存在,各种连接非绝对气密性,户内燃气管路系统存在微小泄漏是可能的。由于居民建筑维护结构普遍存在着自然渗漏作用,因此,普通居民建筑户内燃气管道系统存在微小泄漏率上限。则当户内持续发生的燃气泄漏率低于某值时,在长时间下仅依靠门窗缝隙自然渗透通风,户内不会达到燃气爆炸极限的报警浓度,我们称该值为安全微漏率。

### 2.2 安全微漏率影响因素及量化条件分析

户内燃气泄漏引发的爆炸很多是因为较大的泄漏率、无足够的通风换气和火源共同作用的结果,显然泄漏危险程度的最主要影响因素是泄漏率的大小,其次是通风换气条件。另外户内燃气泄漏扩散过程是一个复杂的动态变化过程,泄漏气体的扩散分布与泄漏燃气的理化性质、泄漏管道系统所处环境以及气候条件有着密切的关系,因此户内燃气管路系统安全微漏率的量化必须要考虑时间、空间及房屋气密性等多方面的变化,量化燃气安全微漏率的因素主要有:规定的泄漏持续时间、燃气安全浓度、密闭空间大小和围护结构的空气渗透量等。本研究所有计算或数值模拟

均假定泄漏气体为纯甲烷,爆炸下限5%。

(1) 排除火源因素外,一定的通风换气条件下,燃气泄漏率与持续时间构成爆炸后果的矛盾双方,即较大的泄漏率在短时间内既可以达到爆炸浓度,反之则需要较长的时间。根据前面安全微漏率的定义,持续时间理论上应该是从开始泄漏到户内燃气扩散浓度基本达到稳定状态时长,考虑到后续计算量的问题以及对无人居住空置房屋管理的考虑,将微漏持续时间定为90天。

(2) 关于燃气空气混合物爆炸极限的报警浓度,根据GB 29550-2013《民用建筑燃气安全技术条件》中的相关规定,无毒燃气在空气中浓度含量小于或等于爆炸下限浓度的25%时应能报警;天然气(按甲烷计)在空气中的爆炸下限为5%(体积浓度),故天然气泄漏报警浓度为1.25%(体积浓度)。本研究是作为泄漏安全性界限值的研究,因此将微泄漏报警浓度进一步增加安全系数,即取爆炸下限浓度25%的50%作为微泄漏安全界限浓度,即当户内90天无人居住时,非射流区域的燃气最高浓度不高于0.625%(体积浓度),此时的微泄漏对户内燃气安全不构成危险。

(3) 房屋的体积,特别是厨房体积,对安全微漏率的取值有影响。根据GB 50096-2011《住宅设计规范》中对厨房面积的规定,一类和二类住宅厨房面积最小为4m<sup>2</sup>,三类和四类住宅厨房面积最小为5m<sup>2</sup>,低于这个数值使人产生不适感。对本研究来说,厨房面积不大于规范规定值是偏于安全的,因为面积小更容易达到爆炸极限浓度。

(4) 根据GB 7106-2019《建筑外门窗气密,水密,抗风压性能分级及检测方法》、GB 50189-2015《公共建筑节能设计标准》、JGJ 26-2018《严寒和寒冷地区居住建筑节能设计标准》等标准,选取气密性要求最为严格的严寒地区民用建筑和10层以上的乙类公共建筑的气密性要求条件,其中窗墙比不大于0.3,门窗单位缝长空气渗透量不大于1.0m<sup>3</sup>/(m·h),具体房屋尺寸见下节。

## 3 管道泄漏量计算

### 3.1 管道泄漏计算模型

燃气管道微泄漏其特点是泄漏量小,属于小孔泄

漏模型。小孔泄漏时气体以较慢的速率释放,基本不会影响管道其余部分的参数条件,可以假设管道压力不变。考虑到孔口尺寸相对较小,泄漏时管道内气体的压力大部分都转化成了气体动能,因此这一过程可以近似地看作是绝热的自由扩散过程。户内燃气管道系统的微泄漏,包括管道上的孔洞、阀门、法兰的裂缝中的泄漏等情况均适用于此类模型。燃气管道小孔泄漏模型的流量可按式(1)计算<sup>[6]</sup>:

$$q_v = \frac{C_g A p}{\rho} \sqrt{\frac{kM}{RT} \left( \frac{2}{k-1} \right) \left( \frac{P_a}{P} \right)^{\frac{2}{k}} \left[ 1 - \left( \frac{P_a}{P} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} \quad (1)$$

式中

$q_v$ ——体积流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;

$A$ ——泄漏口面积,  $\text{m}^2$ ;

$C_g$ ——气相泄露系数,与泄漏口的形状有关;

$K$ ——绝热指数,取1.29;

$M$ ——燃气的分子量,取16 $\text{kg}/\text{kmol}$ ;

$R$ ——理想气体常数,取8.314 $\text{kJ}/\text{kmol} \cdot \text{K}$ ;

$P$ ——管道绝对压力,取103 325Pa;

$P_a$ ——环境绝对压力,取101 325Pa;

$T$ ——室温,取293K;

$\rho$ ——甲烷密度,取0.67 $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

### 3.2 泄漏量静态扩散计算

经过研究比较,从目前的各种实际居住建筑设计图中选取一份具有代表性的建筑模型来进行本次定量计算,计算用民用建筑物理模型见图1,此模型同样应用于后期的数值模拟计算中。该民用建筑模型的长、宽、高分别为6.8m、4.65m、2.8m。模型中分别设置门窗、外门及内门,其中门的高、宽为2.3m、0.9m,外窗的高、宽为0.9m、0.6m。

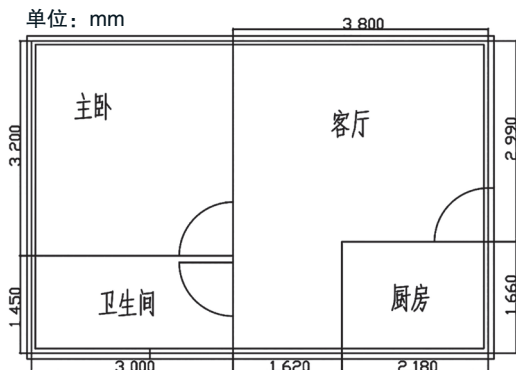


图1 计算用民用建筑物理模型图

计算时内外门及窗户设为关闭,认为泄漏燃气的扩散过程发生在厨房内,仅能通过内外门窗缝隙进行扩散。

考虑到户内燃气泄漏主要发生在燃气胶管管壁,或与灶具相连的接头处,所以本研究将泄漏点设置在灶台内部0.6m高度处。由于燃气密度小于空气,户内燃气泄漏后首先积聚在顶部,因此泄漏区域的高度范围为户内0.6m~2.8m。

如果以户内任意一点浓度达到爆炸下限即可能遇火源发生爆炸为前提,则最顶部燃气的体积浓度最低为5%,此时将泄漏燃气的扩散过程简化为理想的静态模型,即泄漏点0.6m高度处的燃气体积浓度为0%,随着高度的增加,浓度按线性递增至5%。(静态计算结果为安全微漏率的数值验证初始值提供参考。)

按照上述模型和条件设定通过积分计算可得,在常温常压下,房间顶部燃气浓度达到爆炸下限5%时,泄漏的燃气量为0.372kg。当室内门窗完全封闭并且不考虑缝隙渗透量时,厨房达到危险积聚所需的时间和对应静态泄漏率计算结果如表1所示。

表1 危险积聚条件的静态泄漏率计算结果

| 泄漏时间 (天) | 泄漏率 (kg/s)            |
|----------|-----------------------|
| 1        | $4.31 \times 10^{-6}$ |
| 5        | $8.61 \times 10^{-7}$ |
| 60       | $7.18 \times 10^{-8}$ |
| 90       | $4.78 \times 10^{-8}$ |

## 4 安全微漏率的数值验证

基于静态计算的结果,根据安全微漏率的定义,我们利用数值模拟的手段进一步对该安全微漏率的合理数值进行量化及验证。

### 4.1 模型建立及基本假设

数学模型的建立需满足质量守恒定律、动量守恒定律、能量守恒定律、状态方程和组分输运平衡五类方程<sup>[7]</sup>。

模拟过程中考虑内外门窗缝隙及内门的启闭情况,并选取最不利边界条件。根据相关标准,窗墙比不大于0.3,门窗单位缝长空气渗透量不大于 $1.0\text{m}^3/(\text{m} \cdot \text{h})$ ,

并做以下假设:

(1) 天然气、室内空气以及它们的混合气体假定为无黏性的理想气体, 并满足理想气体状态方程的条件;

(2) 天然气扩散过程中不发生化学反应, 模拟使用的是不发生化学反应的组分输运模型, 湍流模型采用标准 $k-\varepsilon$ 模型;

(3) 天然气泄漏是一个连续的过程, 泄漏源的孔口面积和质量流量不随时间改变;

(4) 不考虑整个房间以及室外的热量反应, 不考虑温差产生的偏差作用;

(5) 假定外门、外窗关闭, 室外风速对于室内天然气分布的影响, 仅通过外门和外窗的缝隙渗漏, 且风速方向垂直于门窗所在平面。

利用ICEM软件生成民用建筑模型, 设定网格尺寸参数, 对室内大空间采用均匀的粗网格, 对门窗缝隙和泄漏口进行网格加密处理, 最终网格数量约104万。

#### 4.2 模拟结果与分析

内门和灶台等障碍物会阻碍气体的流通, 所以在模拟中需要考虑内门开启和关闭两种情况。因燃气泄漏后, 房间顶部的燃气浓度达到最大, 因此取屋顶 $y=2.8\text{m}$ 截面进行观察分析, 将计算结果输出至后处理软件Tecplot展示。同时为了量化安全微漏率, 找出在此模型下的最大允许泄漏率, 过程中需要进行多次试算。在内门开启的情况下, 当泄漏率为 $5 \times 10^{-6}\text{kg/s}$ 时, 内门开启90天户内燃气分布情况如图2所示。

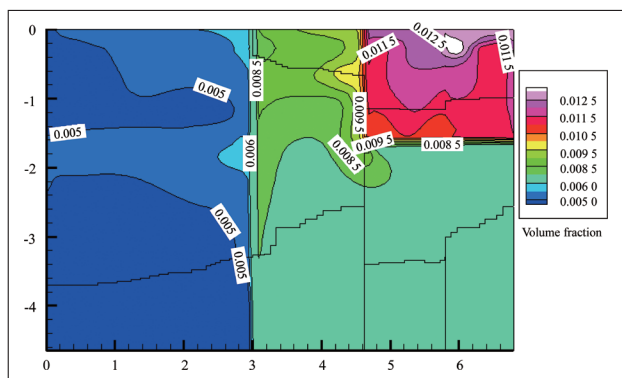


图2 内门开启90天时户内燃气分布情况

当内门关闭时, 气体仅通过内门缝隙及外窗的缝隙扩散, 不考虑厨房灶柜对燃气扩散的影响。同样取泄漏率为 $5 \times 10^{-6}\text{kg/s}$ 进行90天的模拟, 内门关闭90天

时户内燃气分布情况如图3。

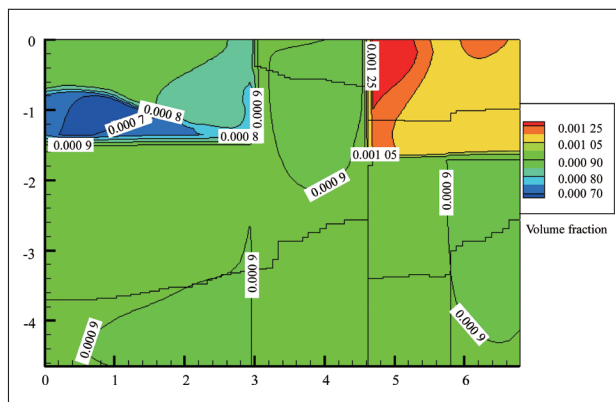


图3 内门关闭90天时户内燃气分布情况

当泄漏发生在厨房灶台内部的情况时, 由于灶台体积更小, 产生危险的可能性会更大。将泄漏口设置在灶台内部, 距地面 $0.6\text{m}$ 高度处, 气体通过灶柜门缝隙及灶台与立管间的孔隙渗漏至厨房其余部分。因灶台内部的燃气浓度明显高于灶台外部, 因此截取灶台内顶部距地面 $y=0.9\text{m}$ 平面进行观察。燃气主要集中在灶柜内, 在厨房外部浓度基本为零, 故仅截取厨房部分显示同样进行了多次试算, 当泄漏率为 $3 \times 10^{-7}\text{kg/s}$ 时, 灶台内发生泄漏90天时, 厨房内的燃气分布情况如图4。

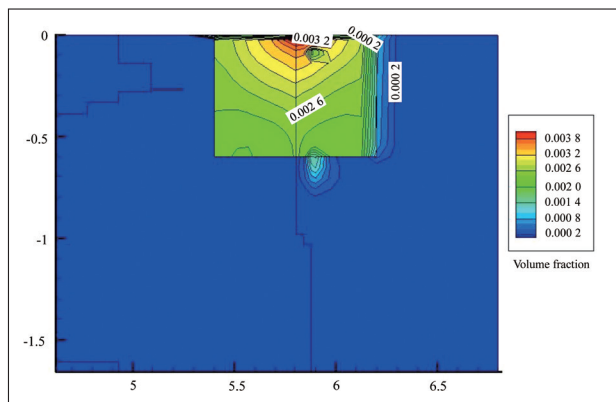


图4 灶台内发生泄漏90天时, 厨房内的燃气分布情况

综合上述模拟结果, 可以发现:

由图2, 在房间内门开启的情况下, 由于房屋的自然渗漏作用使屋内燃气更多集中在厨房内门一侧。当泄漏率为 $5 \times 10^{-6}\text{kg/s}$ 时, 经过90天后最高浓度为 $0.13\%$ , 约为燃气泄漏报警下限浓度的 $10\%$ , 满足前

述安全微漏率的定义与要求。

由图3,在内门关闭的情况下,燃气在厨房内的积聚明显增强,后逐渐向外扩散。当泄漏率为 $5 \times 10^{-6} \text{kg/s}$ 时,经过90天后客厅内全部区域燃气浓度基本超过0.1%,厨房内最高燃气浓度为0.55%,约为燃气泄漏报警下限浓度的50%,略高于前述安全微漏率的定义与要求。

由图4,当泄漏发生在厨房灶台内部时,灶柜内顶部存在最高浓度。当泄漏率为 $3 \times 10^{-7} \text{kg/s}$ 时,在长时间的模拟过程中,灶柜内燃气浓度基本保持稳定,气体通过灶柜门缝隙和连接口缝隙向外扩散,90天时最大浓度为0.4%,约为燃气泄漏报警下限浓度的30%,满足前述安全微漏率的定义与要求。

综合分析在90天内户内泄漏燃气最高浓度不超过燃气泄漏报警浓度的30%,即户内燃气系统安全微漏率不高于 $3 \times 10^{-7} \text{kg/s}$ 。

## 5 结语

户内燃气泄漏、扩散过程是一个复杂的动态变化过程,泄漏危险程度的最主要影响因素是泄漏率的大小。本文提出了居民户内燃气管路系统安全微漏率的定义,并利用孔口泄漏模型对安全微漏率进行初步静态计算,选取具有代表性的实际建筑模型,考虑房间的自然渗透作用,采用数值模型的手段对安全微漏率进行了动态模拟与合理量化。

(1) 通过Fluent模拟的手段对安全微漏率进行验

证与量化,得出在最不利条件下户内燃气管路系统最大允许泄漏率,即安全微漏率不高于 $3 \times 10^{-7} \text{kg/s}$ 。

(2) 长时间无人居住的房屋,应对燃气户内管路系统进行泄漏率的检查;如果不排除微泄漏的存在,入户安检周期应缩短。

(3) 所得安全微漏率,对管道及管件材质气密性检测标准有借鉴意义。

(4) 高层建筑的密封性不利于燃气的使用安全,哪怕是微小的燃气泄漏,在长时间通风不足时仍然可以引起危险后果。

### 参考文献

- [1] 裘学东. 住宅室内燃气安全分析[J]. 宁波化工, 2014 (2): 38-40.
- [2] 王鹏. 户内燃气泄漏的扩散模拟研究及危险效应分析[D]. 哈尔滨工业大学, 2012, 7.
- [3] 徐小羽. 户内燃气安全风险评价体系研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2018, 6.
- [4] 顾伯勤. 液下气泡检漏方法研究[J]. 南京化工大学学报, 2001, 23 (2).
- [5] 严荣松, 赵自军, 郝冉冉. 户内燃气泄漏量与控制指标分析[C]// 2017中国燃气运营与安全研讨会论文集. 2017.
- [6] 彭世尼. 燃气安全技术[M]. 重庆大学出版社, 2015.
- [7] 张甫仁, 阚正武, 尉迟维旭, 等. 温湿度梯度耦合作用下室内燃气泄漏模拟研究[J]. 石油化工高等学校学报, 2012, 25 (4).

## 其它消息

### 国内首次城镇燃气30%掺氢燃烧和分离试验成功实施

2024年9月2日,国内首次城镇燃气高比例掺混氢气燃烧试验和氢气分离试验在浙江省能源集团所属浙能天然气集团成功实施。试验验证了3%~30%比例氢气掺入天然气技术可行性,填补我国利用在役城镇燃气设施进行高比例掺混氢气试验的空白,为实现氢能输送技术自主可控奠定重要基础。

相比其他能源,天然气和氢气同属清洁、高效、环保的气态能源,运输、储存和使用具有类似性,一些场景下可以混输混用,相互转化、互为补充,天然气与氢能融合发展是实现能源深度脱碳的重要选择。

(本刊通讯员供稿)