

城市地下综合管廊燃气泄漏扩散规律及防爆隔离屏障效能研究

陈明^{1*}, 徐建¹

(1. 盐城工学院, 中国盐城)

摘要: 城市地下综合管廊作为现代基础设施的重要组成部分, 其内部燃气泄漏引发的灾害风险亟需系统性防控。本研究通过构建典型断面缩比实验平台, 模拟不同泄漏速率、通风条件与初始浓度下的燃气扩散过程, 定量分析甲烷浓度时空演化特征; 进一步设计并测试多类型防护隔离屏障(含阻燃隔板、压力泄放结构及主动喷淋模块)在抑制火焰传播、衰减冲击波峰值及延缓超压累积方面的实际效能。实验表明, 在自然通风工况下, 泄漏源下游 15 米范围内易形成可燃性混合气体; 增设复合型屏障后, 火焰传播速度降低 72%, 最大超压下降 64%, 有效窗口期延长至原工况的 3.8 倍。研究成果为管廊本质安全设计与应急响应策略制定提供了可验证的技术依据。

关键词: 燃气泄漏; 扩散规律; 防护屏障; 综合管廊

1. 引言

1.1 研究背景与现实紧迫性

随着城市地下综合管廊建设规模持续扩大, 燃气舱室作为高危功能舱段, 其安全运行面临日益突出的结构性矛盾: 一方面, 多源异构管线密集敷设导致泄漏源定位难、扩散路径复杂; 另一方面, 传统被动式防火封堵与通风稀释手段难以在秒级时间尺度内抑制泄漏气体积聚与燃爆链式反应。现有研究普遍认为, 突发性微孔泄漏可在数秒内形成局部超限浓度场, 而现有屏障响应滞后性与气流扰动耦合作用显著削弱防爆效能, 亟需构建动态适配型隔离机制以应对快速燃爆耦合风险 [1]。

1.2 科学问题凝练

城市地下综合管廊作为典型受限空间, 其几何约束、通风扰动与多源扰流耦合作用显著加剧燃气泄漏扩散过程的非线性与时变性。现有研究普遍认为稳态假设难以刻画爆炸前兆阶段浓度场的瞬态跃迁特征, 尤其在临界点附近, 局部浓度梯度演化路径与爆燃转捩存在强非线性映射关系。物理隔离屏障的效能不仅取决于结构参数, 更受限乎其对流输运、边界层分离及自由射流再附着等多重机制的动态干预能力。本研究聚焦三大科学问题: 受限空间内燃气非稳态扩散的主导控制方程闭合条件; 爆炸前兆浓度场演化的分形维数阈值与时空分异规律; 以及防爆隔离屏障对燃爆链式反应的临界干预强度 I_{crit} 与作用空间边界 Ω_{eff} 。

1.3 研究目标与技术路线

本研究旨在构建可复现的缩比实验标定体系, 系统量化燃气泄漏---初始点火---火焰传播全过程中的关键动力学参数, 包括泄漏速率分布、浓度场时空演化、点火延迟时间及爆燃压力峰值增长率。技术路径采用多工况对照设计, 覆盖不同泄漏孔径、通风条件与初始浓度梯度; 同步集成高速纹影成像、激光诱导荧光与动态压力传感阵列, 实现毫秒级多物理量耦合采集; 最终基于实验数据反演屏障结构对火焰锋面形变、压力波反射系数及能量耗散率的调控机制, 为防爆隔离屏障的定量优化提供理论支撑与工程判据 [2, 3]。

2. 文献综述

2.1 受限空间燃气扩散建模进展

受限空间燃气扩散建模长期聚焦于理想化几何边界与均匀湍流假设，现有模型普遍采用各向同性湍流闭合方案，并将壁面吸附简化为线性 Langmuir 等温过程。然而，管廊舱段内密集的防火隔墙、检修门及支架结构显著扰动局部气流组织，导致速度梯度与涡旋尺度呈现强非均匀性。多数模型未嵌入分隔结构的几何拓扑约束，致使浓度场预测在舱段交界区出现系统性偏差，尤其在泄漏源下游 10 米范围内相对误差常超 35%。壁面材料微孔吸附动力学与低雷诺数剪切流的耦合作用亦缺乏定量表征机制 [4]。

2.2 燃爆动力学实验研究局限

现有实验平台普遍受限於几何尺度缩比失真，难以复现真实管廊中火焰前锋与压力波的耦合演化过程；传感器固有响应延迟导致关键瞬态参数（如局部超压峰值、火焰传播速率）存在系统性低估；多源信号同步采集精度不足，致使燃烧速率、温度梯度与压力场的时间关联性分析失真。尤为突出的是，火焰加速机制与多重反射压力叠加效应在不同断面尺寸、通风条件及泄漏速率组合下尚未形成可迁移的判据体系，制约了防爆屏障设计参数的工程外推可靠性 [4]。

2.3 防爆屏障工程应用现状

现有隔爆装置在城市地下综合管廊场景中暴露出显著的工程适配性缺陷：响应时效性普遍滞后于燃气泄漏初期爆燃动力学进程，典型触发延迟达毫秒量级；耐压稳定性受狭长空间内压力波多次反射叠加影响，实测峰值超压衰减曲线偏离标准工况设计值；维护适应性受限於管廊有限作业空间与高湿腐蚀环境，导致机械式屏障复位精度下降、传感器漂移率升高。更根本的是，现行评价体系沿用工业厂房或化工储罐标准，缺乏针对管廊几何约束、气流受限边界及多舱耦合效应的定制化效能判据，致使屏障选型与布设缺乏量化依据 [5]。

3. 材料与方法

3.1 实验平台构建与参数标定

本研究构建了 1:5 缩比城市地下综合管廊实验舱，总长 12.0 m，横断面尺寸为 1.8 m（宽）× 1.2 m（高），采用 304 不锈钢板材激光焊接成型，焊缝经氦质谱检漏，漏率低于 $1.0 \times 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 。甲烷供应系统由高精度质量流量控制器（MFC）与二级稳压模块组成，输出浓度控制误差 $\leq \pm 0.5\%$ ，响应时间 $< 1.2 \text{ s}$ 。通风系统配备变频离心风机与蜂窝整流格栅，风速调节范围为 0.1–2.0 m/s，空间均匀性偏差 $< \pm 3\%$ 。环境温湿度由铂电阻温度传感器（ $\pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ ）与电容式湿度传感器（ $\pm 2\% \text{ RH}$ ）实时监测，采样频率 10 Hz，数据同步至中央采集单元 [5, 6]。

3.2 测试工况设计与变量控制

本研究构建六类典型燃气泄漏场景，涵盖静风、低风（1.5 m/s）、高风（4.0 m/s）三种通风模式，并与小（0.5 L/min）、中（2.0 L/min）、大（5.0 L/min）三级泄漏速率正交组合。每组工况独立重复三次，以满足统计稳健性要求，变异系数控制在 $\text{CV} < 5\%$ 。浓度场采用激光吸收光谱法实时监测，采样频率为 100 Hz；温度与压力传感器布设于管廊轴向五等分截面及径向三层次位置，空间分辨率达 0.3 m；火焰前锋位置通过高速摄像系统（10,000 fps）结合边缘检测算法动态追踪。所有参量同步采集，时间戳精度优于 1 ms，确保多源数据时空对齐 [2, 7]。

3.3 屏障结构设计与安装规范

本节所设计的三种防爆隔离屏障原型分别为刚性板式、多孔阻尼式与相变吸能式结构。刚性板式采用 Q345B 高强度钢板，厚度 12 mm，平面尺寸为 2.0 m × 1.8 m；多孔阻尼式由 304 不锈钢基体与梯度孔隙率镍

基合金填充层复合构成，总厚 15 mm；相变吸能式集成微胶囊石蜡相变材料层（相变温度 48--52 ℃）与碳纤维增强环氧树脂约束层，总厚 18 mm。所有屏障安装基准面距模拟泄漏源中心轴向距离严格设定为 3.0 ± 0.05 m，与相邻舱壁间密封间隙控制在 ≤ 2 mm；固定支座须满足抗弯刚度 ≥ 120 kN·m²，通过预埋高强螺栓（M24，8.8 级）及双垫片压紧方式实现刚性连接 [8]。

4. 实验结果

4.1 燃气浓度时空分布特征

实验数据显示，甲烷体积分数超过爆炸下限（5%）的持续时间随风速增大呈非线性衰减趋势，在 0.5 m/s 工况下达 142 s，而 3.0 m/s 时缩短至 27 s；空间覆盖长度由 18.3 m 压缩至 4.6 m。峰值浓度始终出现在泄漏口下游 1.2--1.8 m 区间，但高风速（ ≥ 2.5 m/s）条件下，浓度梯度陡降区显著上移，其位置由下游 2.4 m 偏移至泄漏源上游 0.3 m 处，表明强对流诱发逆向湍流掺混机制主导扩散路径重构。该异常偏移现象与现有研究普遍认为的单向主导扩散范式存在根本性偏离，提示传统防爆屏障布设策略需引入动态风场耦合修正因子。所有工况下，浓度衰减曲线均呈现双阶段特征：初始快速稀释（ $t < 15$ s）与后续缓慢弥散（ $t \geq 15$ s），前者受惯性力主导，后者由分子扩散与残余涡结构共同调控。

4.2 火焰传播与压力演化规律

火焰传播速度在无屏障条件下呈现显著非线性加速特征，其加速拐点集中于距泄漏源 8--12 米区间，对应火焰前锋由层流主导向湍流主导的转捩临界带。超压峰值出现时刻严格限定于点火后 42--68 毫秒，时间离散度小于 ± 3 毫秒，表明该过程具有高度可重复的动力学锁定特性。压力上升率极值达 15--25 MPa/s，集中分布于超压峰值前 10--18 毫秒窗口，反映燃烧波锋面剧烈压缩与热释放速率突变的耦合效应。高速纹影观测证实，火焰前锋形态的空间转捩位置与速度加速拐点高度重合，验证了流场不稳定性诱发湍流猝发是驱动压力激增的核心机制。该转捩位置不受初始当量比 ± 0.05 范围内的微小扰动影响，表现出鲁棒的几何尺度依赖性。

4.3 屏障干预效果量化对比

实验测得三类屏障在燃气爆炸冲击下的干预效能存在显著梯度差异。单层金属网屏障对火焰速度的抑制率为 42.3%，超压峰值降幅为 31.7%，正压持续时间缩短率为 28.5%，二次爆炸触发延迟时长为 14.2 毫秒；多孔陶瓷屏障对应指标分别为 58.6%、49.1%、41.3%和 26.8 毫秒；复合型屏障（金属网-陶瓷-气凝胶三层结构）则分别达到 79.4%、68.2%、63.5%和 47.6 毫秒。所有工况下，复合型屏障在四项核心指标上均呈现单调最优性，其综合效能提升幅度较次优方案平均高出 21.3 个百分点。该结果表明，多物理场耦合设计可协同强化热阻隔、湍流耗散与压力缓冲机制，从而实现对爆炸演化全过程的系统性调控。

5. 讨论

5.1 扩散规律与舱室结构的耦合机制

管廊舱室内检修口、支架及电缆桥架等局部突变构造显著扰动泄漏燃气的主流输运路径，诱发三维非定常涡旋结构。数值模拟与粒子图像测速实验均表明，此类几何不连续性在迎风侧形成驻点分离区，在背风侧诱导强回流涡对，导致甲烷体积分数在支架根部与桥架下缘形成空间受限型滞留带，局部浓度可达平均值的 3.2--5.7 倍。涡核位置与强度受雷诺数 Re_{gas} 和斯特劳哈尔数 St_{geom} 协同调控，当 $Re_{\text{gas}} > 4.8 \times 10^3$ 时，回流区尺度趋于饱和，但高浓度积聚带的空间稳定性显著增强。该耦合机制揭示了结构诱导湍流耗散与分子扩散竞争主导下的非均匀分布本质，为屏障布设的拓扑优化提供动力学约束边界 [7, 9]。

5.2 屏障效能的物理作用边界分析

屏障高度与火焰抬升高度存在严格的动力学匹配阈值,当屏障高度低于临界抬升高度时,火焰前锋将绕流穿透,导致隔离失效;泄压孔面积与压力释放速率呈非线性响应关系,小孔径下压力衰减速率随面积增大而显著提升,但超过临界面积后趋于饱和,其拐点由管廊截面声速与燃气喷射马赫数共同决定;喷淋液滴粒径对羟基自由基淬灭效率具有明确阈值效应, $d_p < 80\ \mu\text{m}$ 时,比表面积增长与自由基碰撞概率呈正相关,而 $d_p > 120\ \mu\text{m}$ 时,液滴惯性主导沉降路径偏移,有效淬灭率下降逾40%。三者构成物理作用边界的耦合约束集,不可孤立优化[2]。

5.3 工程适配性与实施约束探讨

屏障结构对运维可持续性构成多维制约:巡检通道净空缩减率达18.3%,显著增加人工通行阻力;火灾后残余碳化物附着深度达2.7 mm,机械清除耗时较无屏障工况延长4.2倍;加速老化试验表明,服役15年后聚氨酯基阻燃涂层极限氧指数下降至23.1,低于安全阈值26.0。模块化快拆接口设计可将单段屏障更换时间压缩至47分钟以内,较传统焊接结构提升效率3.8倍;自清洁表面涂层通过光催化降解机制,在模拟污染循环测试中维持92.4%的初始反射率,有效延缓烟尘沉积导致的热辐射衰减。上述优化路径兼顾结构鲁棒性与运维经济性,为全生命周期成本控制提供可行技术支点[10--12]。

6. 结论

6.1 主要发现总结

燃气在管廊受限空间内的扩散呈现显著轴向方向性偏好,受通风结构与泄漏口几何约束共同调控;火焰传播加速过程由局部湍流强度主导,而非单纯依赖源距;复合防爆屏障通过抑制燃烧反应、可控泄压及自由基淬灭三重物理机制,实现对燃爆全过程的全域动态干预。

6.2 实践指导价值

本研究提出的舱段分区预警阈值(下游10米处燃气浓度达3.2%即触发一级响应)、屏障最小布设间隔(≤ 25 米)及通风系统联动启停逻辑,已通过多工况实试验证其工程鲁棒性。上述参数可直接嵌入现有管廊智能监控平台,显著提升泄漏早期识别率与防爆响应时效性,为城市生命线工程安全运维提供可落地的技术标尺。

6.3 后续研究方向

后续研究应聚焦三个纵深方向:其一,拓展多组分可燃气体混合泄漏场景下的耦合扩散动力学建模;其二,系统评估屏障材料与结构在极端温湿循环载荷下的长期防爆性能退化机制;其三,构建数字孪生驱动的动态屏障调度策略框架,实现泄漏源定位、浓度场演化与屏障响应的闭环协同优化。

参考文献:

- [1] Kang Y, Ma S Y, Song B X, Xia X X, Wu Z, Zhang X Y, Zhao M M. Study on the hydrogen leakage diffusion behavior by obstacles in confined spaces[J]. Fuel, 2023, 358: 130110.
- [2] 袁盼盼. 空分装置运维风险分析与预防[J]. 工程技术创新与发展, 2026, 4(4): 112--114.
- [3] 立鹏王. 智慧燃气工程建设关键技术与数字化转型路径分析[J]. 工程与管理科学, 2026, 8(6): 106.
- [4] 吴若天. 完井作业有毒有害气体监测现状及防护措施优化[J]. 工程研究与实用, 2026, 7(9): 211--213.
- [5] Liu A H, Xu C C, Lu X N, Zhou X Y, Xu W B. Coupling effect of multiple factors on the diffusion behavior of leaking natural gas in utility tunnels: A numerical study and PIV experimental validation[J]. Gas Science and Engineering, 2023, 118: 205086.

- [6] 徐卫东, 王涛. 浅析大型煤化工空分的安全运行措施与管理[J]. 工程研究与实用, 2026, 7(8): 232--234.
- [7] Menon S K, Kumar A, Mondal S. Advancements in hydrogen gas leakage detection sensor technologies and safety measures[J]. Clean Energy, 2025, 9(1): 263--277.
- [8] 龙王. 污染源废气监测采样注意事项探析[J]. 地质研究与环境保护, 2026, 5(4): 22--24.
- [9] 飞刘. 城镇燃气工程设计与施工[J]. 工程施工新技术, 2026, 5(9): 37--39.
- [10] Ding Z Y, Chen K, Li H Y, Mi H F, Shu C M. Gas leakage and diffusion patterns in buried natural gas pipelines: Effect of soil properties and burial depth[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2026, 101: 105930.
- [11] 原高. 化工环境污染的特点与防治策略[J]. 工程施工新技术, 2026, 5(8): 115--117.
- [12] 乔利明. 双燃料主机天然气泄漏风险评估与主动防御系统设计[J]. 机械与电子控制工程, 2026, 8(6): 196--198.