

城市地下综合管廊掺氢天然气爆炸规律研究

赵光帅 常松 王巍 李彦杰 祖亚凡 郭燕燕

正元地理信息集团股份有限公司, 北京市, 101300;

摘要: 随着掺氢天然气 (HCNG) 在城市综合管廊中的规模化应用, 其爆炸风险因氢气的高扩散性和宽爆炸极限显著增加。本研究基于 FLACS 软件构建三维数值模型, 系统探究了通风口特征 (位置、面积、长宽比)、气云长度及点火位置对管廊内 HCNG 爆炸超压、火焰传播及温度分布的影响。研究结果为掺氢天然气管廊的安全设计与防爆优化提供了理论与技术支撑。

关键词: 掺氢天然气; 综合管廊; 通风口特征; 爆炸超压

DOI: 10. 64216/3080-1508. 25. 06. 010

引言

随着氢能作为清洁能源的推广, 掺氢天然气 (HCNG) 在综合管廊中的应用逐渐增多, 但氢气的高扩散性、低密度及宽爆炸极限 (4%-75%) 特性显著增加了管廊内燃气泄漏后的爆炸风险。智能通风系统的研究 (如结合氢气浓度传感器与动态风阀调控) 可实现泄漏初期的实时预警与自适应通风, 大幅缩短危险气体滞留时间。相关成果不仅为掺氢天然气管廊的安全运行提供技术支撑, 还可推动氢能基础设施与城市地下空间的协同发展, 助力能源低碳转型背景下的风险防控体系构建。

1 综合管廊掺氢天然气爆炸数值模拟方法研究现状

通过风洞实验与 Realizable $k-\epsilon$ 模型数值模拟, 研究了地下管廊通风口位置、尺寸及空气交换率对天然气泄漏扩散的影响, 发现合理设置通风口并提升空气交换率可有效抑制气体扩散范围和浓度累积。通过 FLACS 模拟侧向通风口对隧道气体爆炸的影响, 发现侧向通风可降低峰值压力 42%-78%, 强调通风口布局对爆炸危害缓解的关键作用。

通过数值模拟与实验相结合的方法, 系统揭示了地下管廊及隧道内天然气或氢混合气体 (HBNG) 泄漏扩散规律及其爆炸风险, 提出了通风参数 (速度、频率、布局) 优化策略, 例如通风速度 5-7m/s、通风频率提升至 15 次/h、双风机压入式布局等, 显著降低了可燃气体浓度及爆炸过压峰值, 为工程通风系统设计与安全管理提供了重要理论支撑。

2 综合管廊掺氢天然气爆炸实验方法研究现状

通过实验探究了 H/CH₄ 预混火焰在通风管道中的传播特性, 采用高速摄像和压力传感器对比不同管道尺寸 (截面积、长度) 及氢气比例的动态影响, 发现 “郁金香” 火焰形态随截面积增大或氢气比例升高而消失, 但随管道长度增加愈发显著, 超压最大值与截面积负相关且随管道延长而升高; 基于 1:5 比例实验装置模拟天然气泄漏, 结合 schlieren 成像系统分析了不同通风速率 (5.11-9.15 m/s) 对地下管廊气体扩散的影响, 结果表明提高通风速率可降低峰值浓度 (最高提升 28% 稀释效率) 并优化报警响应, 为工业通风及防爆设计提供了理论依据。

3 研究内容与方法

3.1 主要研究内容

本研究要系统性剖析掺氢天然气在城市综合管廊里的爆炸特性, 着重关注通风口特征, 以及管廊内气云长度、点火位置等因素对气体分布和爆炸行为产生的影响, 研究运用三维计算流体力学软件 FLACS, 结合城市地下综合管廊燃气舱室实际建设状况, 构建覆盖燃气管道、管道支撑、通风井等基础设施的管廊等比例物理模型, 以此为实验研究和数值模拟提供科学依据。

3.1.1 构建管廊掺氢天然气爆炸数值模型

为确保研究的准确性和可靠性, 利用 FLACS 软件开展数值模拟研究。构建与实际管廊等比例的虚拟模型, 模型中包含燃气管道、管道支撑、通风井等关键基础设施, 严格遵循相关规范和实际建设情况。通过设置不同类型的通风口, 模拟掺氢天然气的爆炸过程。通过数值模拟的方法, 全面分析气体在管廊内的爆炸特性, 为研究提供有力支持。

3.1.2 研究通风口特征对管廊内掺氢天然气爆炸的影响

通过数值模拟的方法,利用 Gexcon 公司开发的三维计算流体力学 CFD 软件,通过分析管廊内爆炸超压、火焰速度和高温来研究通风口特征对管廊内掺氢天然气爆炸的影响,以此来研究管廊内不同条件下爆炸产生的危险区域的情况。

3.1.3 研究气云长度和点火位置对管廊内掺氢天然气爆炸的影响

研究气云长度以及点火位置对爆炸特性分布规律的影响,包括爆炸压力、火焰传播规律等关键参数。通过对数值模拟结果的分析,揭示掺氢天然气在管廊内的爆炸特性规律。

3.2 技术路线

本文运用三维计算流体力学 CFD 软件 FLACS,开展城市地下综合管廊燃气舱室掺氢天然气爆炸现象分析研究,以阐明通风口特征对其影响机理,并浅析通风口特征对掺氢天然气爆炸灾害的影响,研究路线图 1-2 所示。

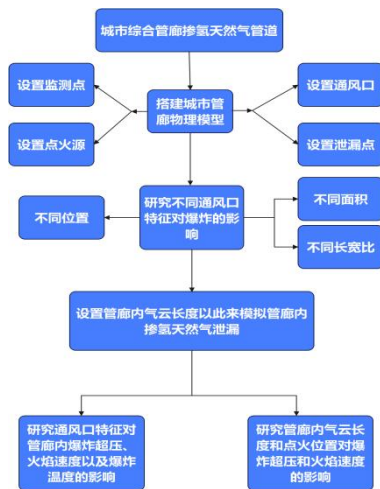


图 1-2 研究技术路线图

1. 按照《城市综合管廊工程技术规范》GB 50838-2015^[20],运用 FLACS 对城市综合管廊建立包括掺氢天然气管道,管道支撑,通风井等基本设施的物理模型。

2. 假设管廊内一定部分内充满了掺氢甲烷气体,以此来模拟掺氢天然气的泄漏。依据《危险化学品生产装置和储存设施风险基准》设置一个点火源,设置不同位置、面积、长宽比的通风口各 5 个,以此来模拟研究不同通风口特征对掺氢天然气爆炸的影响。设置监测点,以研究掺氢天然气在不同通风口情况下的爆炸特征。

3. 基于前面的研究进一步分析不同气云长度条件

和不同点火位置对管廊内爆炸的影响,同样是每一方面分别设置 5 个工况进行研究,以此来模拟研究不同通风口特征对掺氢天然气爆炸的影响。设置监测点,以研究掺氢天然气在不同通风口情况下的爆炸特征。

4 爆炸数值方法

4.1 数值方法

在建立爆炸的数值模型时,需要对研究对象和范围边界进行一定的假设和简化,以此方便问题的定量化和建模,以准确反映研究问题的主要特征,具体如下:

(1) 气体是以均匀密度在管廊内扩散,忽略气体重力的影响。

(2) 在爆炸过程中,气体存在热传导、热辐射以及燃烧产物的热扩散等能量耗散效应。

4.2 控制方程

本研究控制方程包括动量方程、连续性方程、湍流模型和物质输运方程,如下所示:

①质量守恒方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\beta_v \rho) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\beta_j \rho u_j) = \frac{\dot{m}}{V} \quad (2-1)$$

式中 β_v 为体积空隙度, β_j 为第 j 方向的面即孔隙度,无量纲量; u_j 为 j 方向上的速度分量, m/s; x_i, x_j 为坐标空间变量。

②动量守恒方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\beta_i \rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\beta_j \rho u_i u_j) = -\beta_i \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\beta_j \mu_{eff} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}) + F_{oi} + F_{wi} + \beta_i (\rho - \rho_0) g \quad (2-2)$$

式中 u_i 为 i 方向上的速度分量, m/s; p 为超压, Pa; F_{oi}, F_{wi} 为网格阻力, F_{wi} 为边界阻力; g 为当地重力加速度值, m/s²。

③燃料质量分数的输运方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\beta_v \rho Y_{fuel}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\beta_j \rho u_j Y_{fuel}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\beta_j \frac{\mu_{eff}}{\sigma_h} \frac{\partial Y_{fuel}}{\partial x_j} \right) + R_{fuel} \quad (2-3)$$

式中, Y_{fuel} 为燃料质量分数; R_{fuel} 为燃料反应速率, kg/(m³·s)。

④混合分数的输运方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\beta_v \rho \xi) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\beta_j \rho u_j \xi) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\beta_j \frac{\mu_{eff}}{\sigma_h} \frac{\partial \xi}{\partial x_j} \right) \quad (2-4)$$

式中, ξ 为混合分数。

4.3 湍流方程

针对掺氢天然气射流的动力学特性,本研究采用 Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型对湍流运动进行数学表征。该

模型在包含射流混合效应及气体泄漏扩散过程的数值模拟中表现出较高的计算精度。在雷诺应力张量的构建上,本研究采用基于涡粘性理论的数学模型进行建模,其控制方程组可表述为:

①湍流动能的输送方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\beta_j \rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\beta_j \rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\beta_j \frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + \beta_j P_k - \beta_j \rho \epsilon \quad (2-5)$$

式中, k 为湍流动能, m^2/s^2 ; P_k 表示生成的湍流动能, m^2/s^2 ; ϵ 表示湍流动能耗散, m^2/s^3 。

②湍流动能能量耗散率的波动方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\beta_j \rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\beta_j \rho u_j \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\beta_j \frac{\mu_{eff}}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + \beta_j P_\epsilon - C_{2\epsilon} \beta_j \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (2-6)$$

式中, σ_k 为 k 的普朗克常量, 常量 $C_{2\epsilon} = 1.92$ 。

③有效黏度的定义如下:

$$P_k = G_s + G_w + G_b + G_o \quad (2-7)$$

式中, G_s 为流动剪应力; G_w 为壁面剪应力; G_b 为浮力; G_o 为网格子对象; P_k 表示生成的湍流动能

④基于涡流粘性假设的雷诺应力张量建模:

$$-\rho \overline{u_i u_j} = \mu_{eff} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \rho \frac{2}{3} k \delta_{ij} \quad (2-8)$$

式中, $\overline{u_i u_j}$ 表示 i 和 j 方向的平均速度, m/s 。

4.4 火焰模型

针对 FLACS 软件中爆炸过程的数值模拟关键技术,本研究采用 k -epsilon 湍流模型被广泛应用于爆炸湍流场的高精度数值重构,而 beta 模型则通过动态调节化学反应速率参数的方式,为爆炸过程的数值验证提供有效支撑。

FLACS 软件采用 k -epsilon 湍流模型重构爆炸湍流场,结合 β 模型动态调节反应速率。基于湍流-化学动力学耦合框架,通过有限体积法在三维网格中实施 β 因子扩散系数缩放与 $1/\beta$ 反应速率折减的数值加厚技术,突破网格分辨率限制。其数值控制方程可表述为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\beta_j \rho Y_{fuel}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\beta_j \rho u_j Y_{fuel}) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\beta_j \rho D \frac{\partial Y_{fuel}}{\partial x_j} \right) + R \quad (2-9)$$

$$c = 1 - \frac{Y_F}{Y_{Fo}} \quad (2-10)$$

$$R_F = C_{\beta R_F} \frac{S}{\Delta} \rho \min[c, 9(1-c)] \quad (2-11)$$

这是由基于有限体积的 CFD 程序求解的守恒方程的实际形式, 式中 R 为混合气体常数; c 代表过程变

量; Y_{Fo} 为初试燃料质量分数, Y_F 为当前燃料质量分数; x_j 代表在 j 方向上积分; R_F 燃烧反应速率, $kg/m^3/s$; $C_{\beta R_F}$ 为模型常数; S 燃烧速率, 随流动情况变化。

4.5 物理模型

根据《城市综合管廊工程技术规范》,天然气管道应布置在综合管廊的独立舱室中,舱室应每隔 200 m 分隔成独立的防火分区,根据标准,综合管廊的高度应至少为 2.4 m,维修通道的宽度应为 0.9 m。管廊中管线的安装间距如图 2-1 所示, a 、 b_1 、 b_2 的值是根据管线直径和材料确定的。

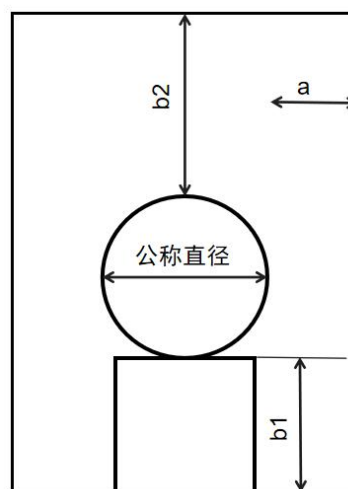


图 2-1 管廊截面图

对燃气舱内其他设施诸如控制电箱、管线及其支架等进行简化处理,同时忽略燃气管道的支座形式和结构,统一构建为立方体形状的水泥支座,规格为 $0.5 \times 0.6 \times 0.5$ m,每隔 10 m 布置一个支座。根据实际工程设计进风口和出风口,尺寸为 1×1 m。通风口联通舱室与通风井,通风井位于该管廊模型两侧。尺寸为 $5 \times 2 \times 3$ m。四周设有排气口。构建的管道示意图 2-2 如下所示。

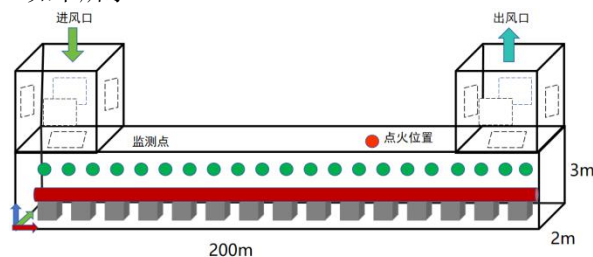


图 2-2 搭建的管廊模型图

FLACS 软件构建掺氢天然气泄漏爆炸三维模型,采用 Realizable k - ϵ 湍流模型描述气体湍流,结合连续

/动量/质量分数/混合分数方程控制体系, beta 火焰模型模拟燃烧速率。沿管廊轴向每 10m 设监测点, 追踪超压、火焰传播及温度分布动态特征。

0.20m 网格对于爆炸超压的动态演变规律, 例如反射波叠加效应、压力震荡衰减等, 呈现出了良好的稳定性, 为后续工况模拟提供了可靠依据, 另外管廊内部的支撑结构、通风井布局以及监测点密度, 总共是 60 个, 保证了模型可高度还原真实场景, 为掺氢天然气爆炸灾害的精准评估提供了有力技术支撑。

5 结语

本研究采用数值模拟方法探究了城市地下综合管廊掺氢天然气爆炸的规律研究, 研究结果可以为城市地下综合管廊结构抗爆和通风系统设计及灾害风险评估提供科学支撑。

针对城市地下综合管廊泄漏问题的研究, 需融合物联网、人工智能及材料科学等技术, 开发高灵敏度多参数传感器网络与机器学习驱动的实时监测预警系统, 突破复杂环境下泄漏源的精确定位, 构建“监测—评估—修复”一体化智能防控体系。

参考文献

- [1]王恒栋. 对《城市综合管廊工程技术规范》GB50838—2015 修编的几点思考[J]. 江苏建筑, 2019, 32(3): 4-6.
- [2]段鹏飞, 张进盛, 常曦文, 等. 掺氢天然气在管廊中的泄漏扩散特性[J]. 油气储运, 2023, 42(08): 901-909.
- [3]陈坤, 林浩, 陈洁, 等. 通风状态下综合管廊燃气管道小孔泄漏扩散模拟研究[J]. 安全与环境学报, 2023, 23(10): 3545-3553.
- [4]《城市综合管廊工程技术标准》GB/T50838-2015.
- [5]城市地下综合管廊建设规划技术导则[J]. 上海建材, 2019, (4): 6-13.
- [6]徐伟. 地下综合管廊燃气舱通风分区长度及高度对爆炸冲击波传播特征的影响研究[J]. 工业安全与环保, 2025, 51(05): 81-84.
- [7]焦一飞, 曾文慧, 刘晓宇, 等. 综合管廊燃气爆炸冲击波超压演化及火焰传播特征[J]. 工程爆破, 2024, 30(04): 34-41.
- [8]夏微. 综合管廊燃气舱燃气爆炸冲击波传播特征研究[D]. 安徽理工大学, 2022.