

隧道车用压缩天然气动态泄漏扩散与燃爆特性

漆琦, 黄小美, 阳东, 吕山, 陈刘洋
(重庆大学土木工程学院, 重庆 400045)

摘要: 为探索隧道中车用压缩天然气泄漏扩散过程中浓度场演化与燃爆后果特性, 采用计算流体力学方法研究不同车辆 CNG 泄漏总量、障碍物条件以及典型泄漏口朝向对车用压缩天然气动态泄漏扩散浓度分布特性的影响。基于泄漏扩散形成的等效化学计量气云体积变化曲线, 通过数值模拟计算隧道空间形成最大等效化学计量气云时刻的点火燃爆后果。结果表明: 当泄漏口朝上时在泄漏初期形成体积最大等效化学计量气云, 而泄漏口朝下时等效化学计量气云体积峰值的形成有延时; 车辆障碍物的存在会延缓燃气爆炸超压力的泄放, 但对超压力没有明显增强作用。

关键词: 隧道; 压缩天然气; 泄漏; 等效化学计量气云; 燃爆

中图分类号: TK16 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-8740(2024)06-0626-09

Dynamic Leakage Diffusion and Combustion Characteristics of Compressed Natural Gas for Tunnel Vehicles

Qi Qi, Huang Xiaomei, Yang Dong, Lü Shan, Chen Liuyang
(School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: To explore the dynamic leakage diffusion concentration field evolution of automotive CNG in tunnels and the consequences of explosion, the computational fluid dynamics method was used to study the total amount of CNG (compressed natural gas) leakage from different vehicles, and the dynamic leakage diffusion concentration distribution characteristics of automotive CNG under obstacle conditions and typical leakage port orientation conditions. Based on the volume change curve of the equivalent stoichiometric gas cloud formed by leakage diffusion, the ignition and explosion consequences at the time when the maximum equivalent stoichiometric gas cloud is formed in the tunnel space are calculated by numerical simulation. The results show that when the leakage port is facing upwards, the equivalent stoichiometric gas cloud reaches the largest volume at the beginning of the leakage, and when the leakage port is facing downwards, the formation of the peak volume of the equivalent stoichiometric gas cloud has a delay. The presence of vehicle obstacles will delay the release of gas explosion overpressure, but it has no obvious enhancement effect on overpressure.

Keywords: tunnel; compressed natural gas; leakage; equivalent stoichiometric gas cloud; combustion explosion

收稿日期: 2024-03-01.

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFC3002000).

作者简介: 漆琦(1998—), 女, 硕士研究生, 20191702070t@cqu.edu.cn.

通信作者: 黄小美, 男, 博士, 副教授, hxm1980@cqu.edu.cn.

随着低碳政策的持续实践,以轻烃燃料作为汽车燃料成为汽油车与电车等新型清洁能源汽车的过渡型式,其中压缩天然气(compressed natural gas, CNG)燃料在当前的公交车、出租车等城市公共交通中得到广泛应用,一些重型卡车也将 CNG 作为燃料. 由于压缩天然气的高压特性以及天然气本身的易燃易爆性质,其意外释放可能造成严重的后果,尤其是隧道等狭长空间内的燃气泄漏更是为泄漏气云燃爆事故提供了有利条件. 因此,对隧道内的车用高压气体燃料的意外释放后果进行量化研究有较大意义.

针对隧道内燃气泄漏场景, Li^[1]采用理论方法计算隧道内燃料车泄漏后发生池火、射流火和沸腾液体膨胀蒸气爆炸的后果. 对于隧道内定流量燃气泄漏, Lu 等^[2]研究了隧道管道天然气泄漏过程,发现泄漏口朝向对浓度场的影响较小,但泄漏面积与位置的影响较大. Sun 等^[3]研究了隧道内液化天然气罐车泄漏过程,发现泄漏口为垂直方向时相比于水平方向更易积聚可燃气云. 对于变泄漏量燃气泄漏, Lü 等^[4]研究了停车场内的氢燃料电池汽车热激活减压装置的氢气释放、扩散和射流火行为, Cui 等^[5]研究了氢燃料电池汽车氢气在公路隧道中动态泄漏过程, Li 等^[6]对比研究了氢燃料电池汽车与 CNG 汽车燃气泄漏射流火事故持续时间与危险距离. 针对隧道内气体爆炸方面, Zhu 等^[7]通过数值模拟研究了隧道内均匀浓度燃气气云爆炸的后果,发现阻塞率的增加会提升超压峰值,并且正方形截面条件下产生的超压峰值更小. Groethe 等^[8]通过实验对隧道内均匀浓度氢气混气爆炸进行研究,结果表明,障碍物对隧道内均匀混气爆炸超压的增强程度不显著. Li 等^[9]利用气相色谱法分析隧道内实际泄漏燃气的气质样本,通过数值模拟计算不同泄漏流量导致的燃爆后果,与现场结构损坏情况对比,以分析事故泄漏源条件. Houf 等^[10]利用 FLACS 软件模拟研究多个氢气储罐同时泄漏后产生的爆炸后果,与实验结果对比,其超压变化具有一致性. 彭新宇等^[11]通过实验研究了不同横风风速、泄漏流量以及泄漏孔径条件下罐车内燃气泄漏后射流火行为及温度变化特征. 邹强等^[12]通过实验研究了甲烷射流的自燃特性,结果表明射流速度的增加会导致自点火位置的下降.

现有的研究鲜少考虑车辆障碍物对车用 CNG 动态泄漏流场以及燃爆后果的影响. 本文旨在研究车用 CNG 气瓶动态泄漏扩散过程与燃爆后果. 首先开展小尺寸实验,对模拟结果进行验证,通过数值模拟研究不同气瓶容量条件以及不同障碍物条件下形成的动态泄漏浓度场,并对泄漏浓度场最危险时刻的点

火燃爆后果开展数值模拟研究.

1 数值计算方法

1.1 数值模拟及小尺寸实验验证

隧道模型与原型长度相似比例为 1 : 20, 模型尺寸为长 10 m、宽 0.6 m、高 0.27 m, 按弗劳德模型设置实验参数. 采用光纤分布式激光甲烷浓度测试仪监测甲烷浓度,在测试浓度范围内测试精度为示值的 $\pm 5\%$, 探头布置在隧道顶部,如图 1 所示,共 10 个探头,设备轮询时间为 3 s. 实验气体为甲烷,泄漏口位于距隧道底部 8 cm 高度的平面上,纵向上距隧道端口 2.5 m, 朝向为竖直向上,泄漏流量为 8 L/min, 实验时长为 300 s. 同时,利用 FLACS V9.0 构建相同的物理模型开展泄漏扩散过程数值模拟.

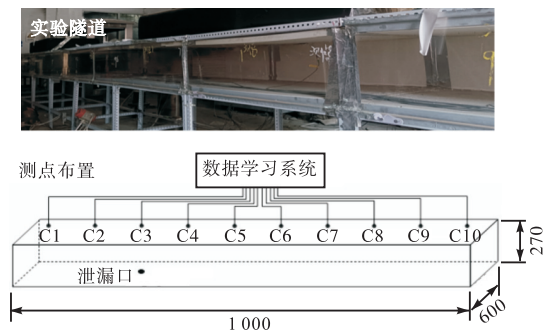


图 1 实验台示意(单位: mm)

Fig.1 Schematic diagram of the experimental platform (unit: mm)

泄漏过程中气体受浮力驱动向隧道顶部运动,各测点浓度随时间迅速上升至一定浓度后,在该浓度水平附近波动. 实验与数值模拟的测点 6 与测点 10 在不同时刻的甲烷浓度对比如图 2 所示,数值模拟结果与实验结果接近,但受实验场所环境风等因素的干扰以及数值模拟时的误差影响,两者的测点浓度也存在一定偏差.

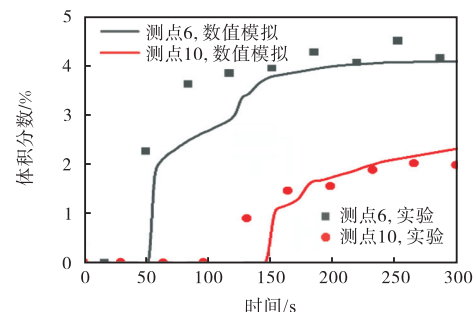


图 2 小尺寸实验与数值模拟结果对比

Fig.2 Comparison of small-scale experiment and numerical simulation results

1.2 泄漏源模型

CNG 气瓶泄漏过程中,罐内气体滞止压力随泄

位置沿隧道下游堵塞,如图 6 所示,将隧道空间内每 25% 长度划分堵塞的起始点,堵塞条件下车辆间距设为 2 m,在拥堵状况下各车道的堵塞条件一致.选取最典型的泄漏口朝向情况,本文主要讨论泄漏口朝上与朝下两种情况.模拟过程中选用 $k-\varepsilon$ 湍流模型,应用壁面函数处理近壁面区流动,泄漏扩散数值模拟中

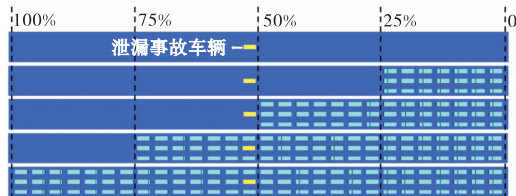
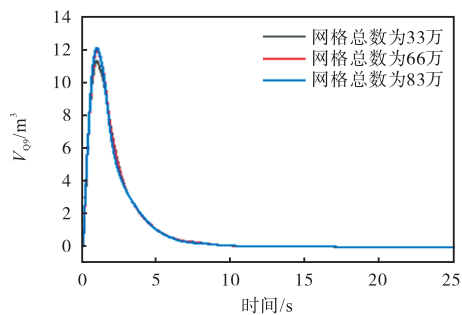


图 6 车辆堵塞示意图

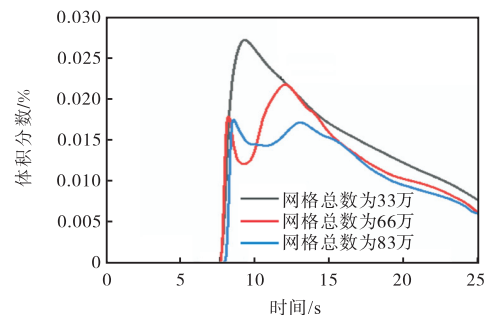
Fig.6 Vehicle jam schematic diagram



(a) 化学计量气云体积

各方向采用 Nozzle 边界条件. 泄漏扩散数值模拟基于质量守恒方程、动量守恒方程以及组分输运方程.

泄漏口朝上且泄漏量为 10.67 kg 时,用 3 种不同大小的网格对其进行网格划分,其网格数量分别为 33 万、66 万以及 83 万.在 FLACS 用户指南中, V_{Q9} 是根据实际浓度场通过处理计算得到的等效化学计量气云体积,是非均质气体云的缩放,在相同条件点火爆炸时会产生与原始云相似的爆炸载荷^[14],不同网格条件下等效化学计量气云体积如图 7(a) 所示,隧道中心点处浓度变化曲线如图 7(b) 所示,考虑其计算结果差异在可接受范围内,同时 66 万的网格尺寸相对于 33 万的网格尺寸对障碍物的展现效果更好,在后续的模拟中采用 66 万的网格尺寸进行数值模拟.



(b) 隧道中心点体积分数

图 7 网格独立性计算结果

Fig.7 Grid independence calculation results

2 结果与讨论

2.1 两种泄漏源朝向形成的浓度场

当隧道中没有车辆障碍物时,CNG 车泄漏过程

形成的浓度场随时间变化如图 8 和图 9 所示,当泄漏口朝上时,受初始动量以及浮力的作用,泄漏气体短时间内迅速向上运动,同时沿隧道顶部向纵向扩散,随着泄漏过程中流量不断降低,根据图中等值线变化

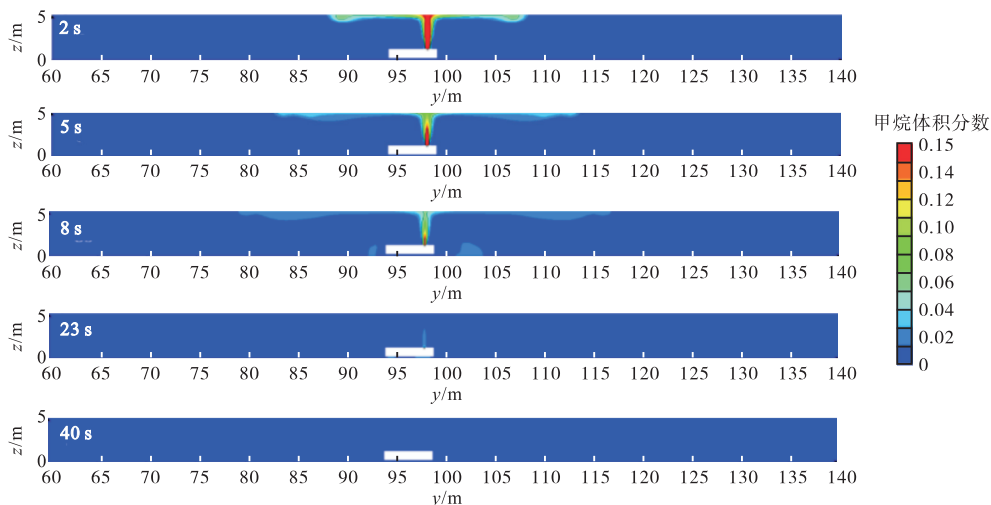


图 8 当泄漏口朝上时 CNG 车泄漏浓度场随时间变化云图 (80 L 气瓶)

Fig.8 Cloud diagram of leakage concentration field of CNG vehicle changing with time with the leak source facing upward (80 L)

(甲烷爆炸下限 5%), 总体呈现出纵向上蔓延距离先增加后减少的趋势. 当泄漏口朝下时, 泄漏初期高速气流向地面冲击后, 沿四周运动, 由于初速度方向与浮力作用方向相反, 泄漏气云经动量耗散后在浮力作用下向隧道顶部蔓延, 对比泄漏口朝上工况, 由于初始动量与浮力对于泄漏气体蔓延起相反作用, 泄漏可燃燃气云消散更慢.

在隧道距顶部 0.2 m 的中心线上, 以纵向位置 10 m 为起点, 每隔 20 m 设置一个甲烷浓度测点, 图 10 和图 11 展示了隧道各测点甲烷浓度分布. 泄漏口

朝上时, 泄漏源附近的测点浓度在短时间内迅速上升, 随着泄漏流量的降低以及泄漏气体的持续扩散, 泄漏源附近的测点浓度不断降低, 而泄漏气体向两端蔓延使远距离测点浓度数值升高. 泄漏口朝下时, 各测点在泄漏初期没有浓度数值, 随着浮力驱使泄漏气体不断向隧道顶部运动, 从泄漏源附近的测点至两端测点依次测试到甲烷浓度.

2.2 障碍物对浓度场形成的影响

当气瓶容量为 600 L, 车辆阻塞率为 100% 时甲烷泄漏过程见图 12, 泄漏口朝上时, 由于初始动量与

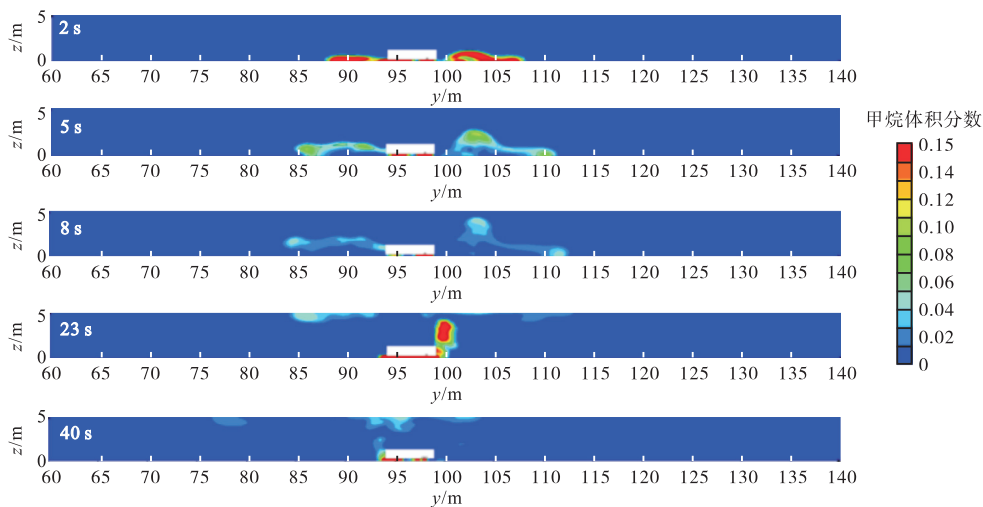


图 9 当泄漏口朝下时 CNG 车泄漏浓度场随时间变化云图 (80 L 气瓶)

Fig.9 Cloud diagram of leakage concentration field of CNG vehicle changing with time with the leak source facing downward (80 L)

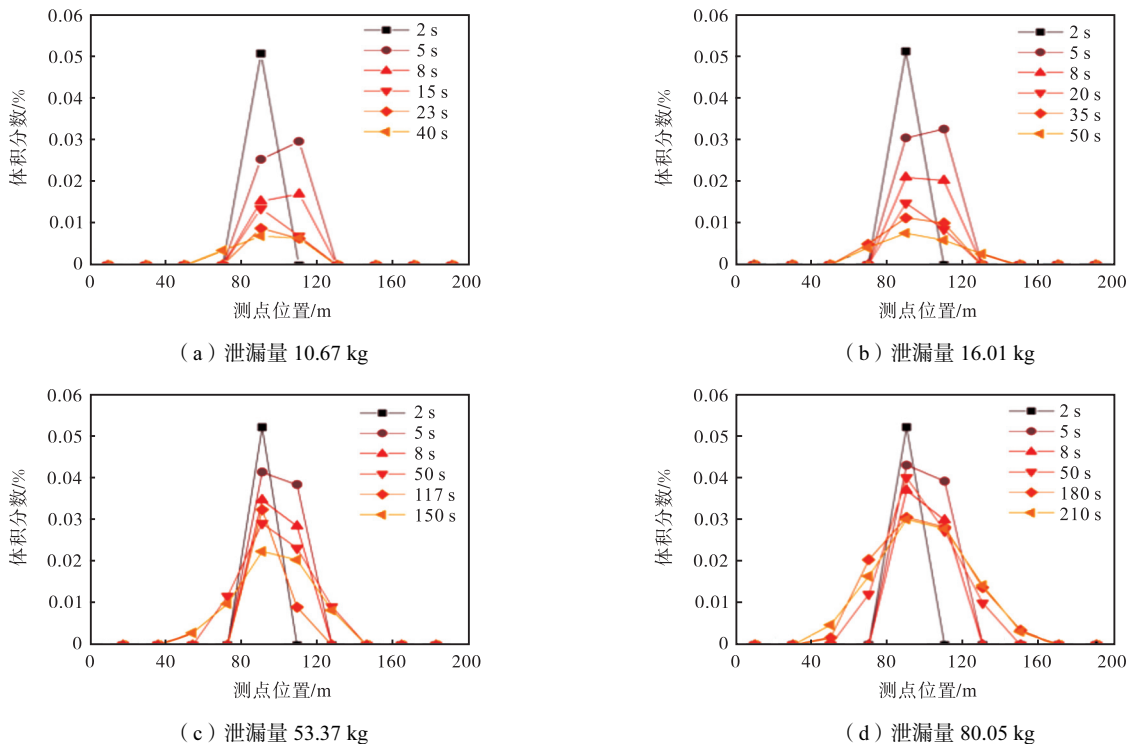


图 10 当泄漏口朝上时不同时刻各测点甲烷体积分数分布

Fig.10 Distribution of methane concentration at different time points with the leak source facing upward

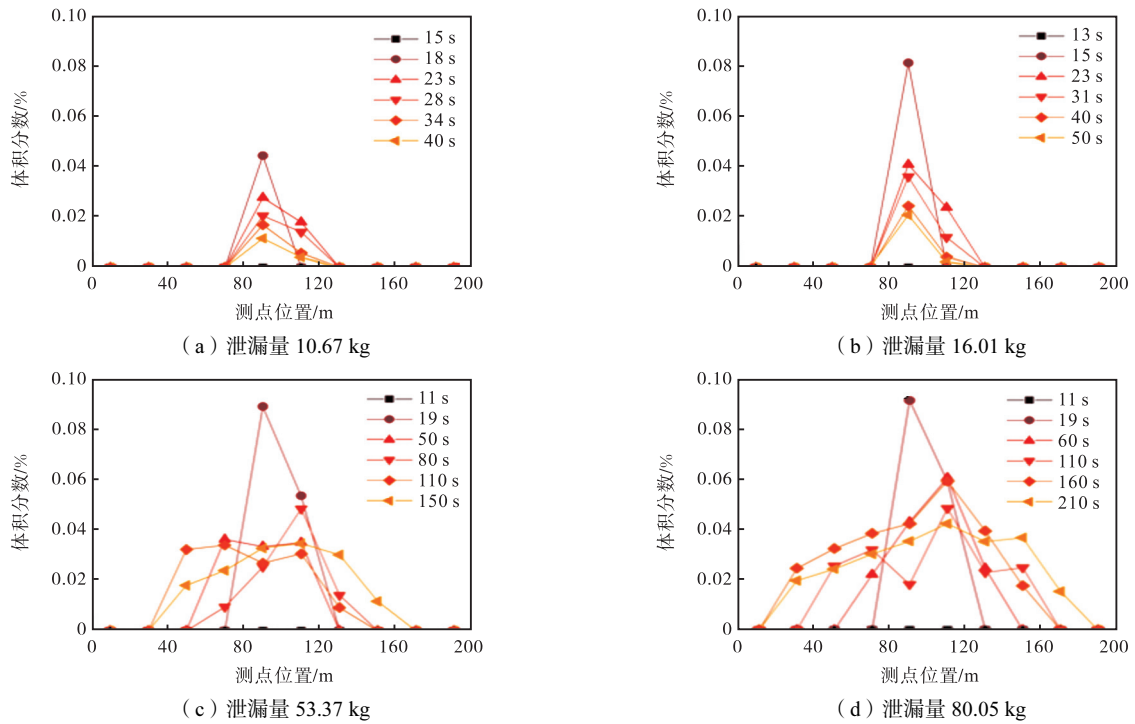


图 11 当泄漏口朝下时不同时刻各测点甲烷体积分数分布

Fig.11 Distribution of methane concentration at different time points with the leak source facing downward

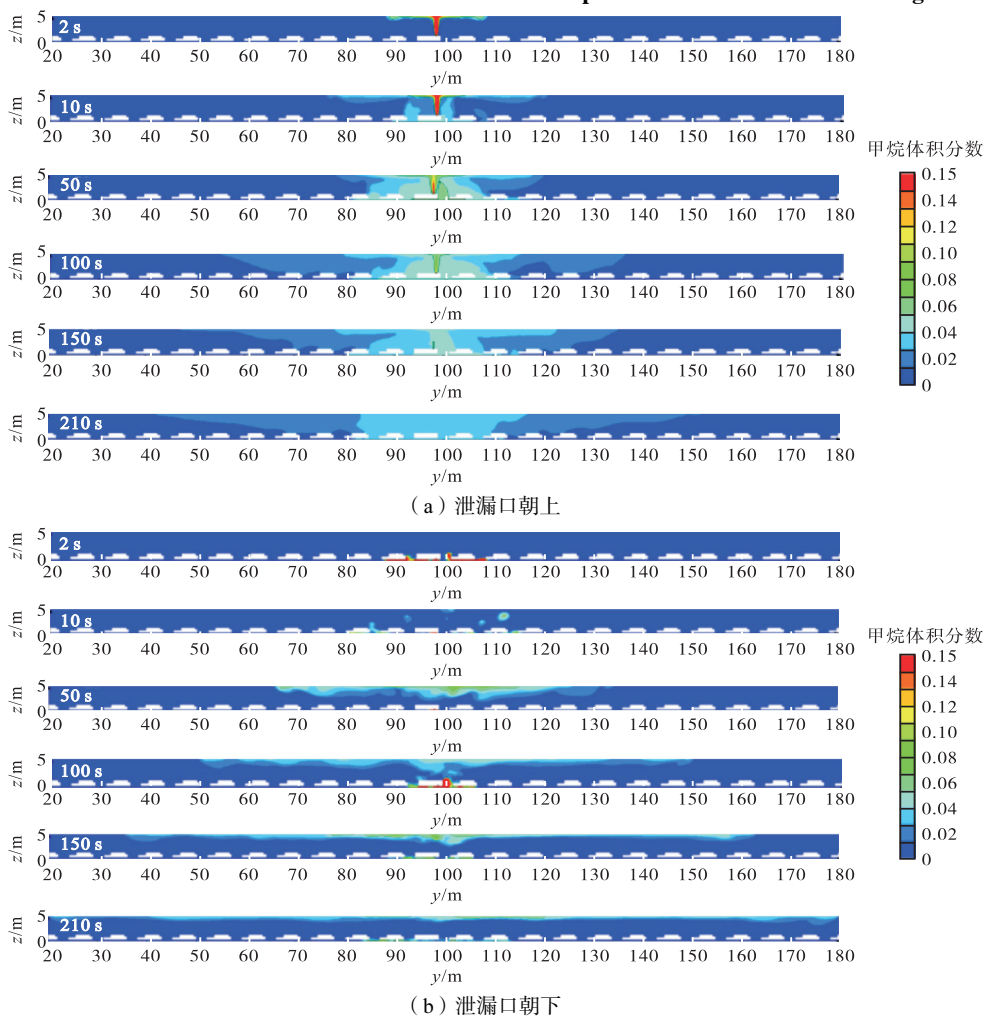


图 12 车辆阻塞率为 100% 时泄漏过程甲烷浓度分布云图(600 L 气瓶)

Fig.12 The distribution of methane concentration of leakage process when the vehicle blocking rate is 100% (600 L)

浮力均驱使泄漏气体向隧道顶部运动, 车辆障碍物对泄漏浓度场初期的发展几乎没有影响. 当泄漏口朝下时, 泄漏气体向隧道地面冲击后沿地面向四周运动, 在浮力驱动气体向隧道顶部运动的过程中, 积聚在车辆底部的泄漏气体逐渐上升, 对比图 8 和图 9 可见, 障碍车辆对泄漏气体向上运动有延缓作用.

如图 13 所示, 泄漏口朝上时, 等效化学计量气

云体积 V_{Q_0} 变化趋势为泄漏初期迅速上升后随泄漏率的降低逐渐下降, 高泄漏量工况 53.37 kg 与 80.05 kg 时, 在经历泄漏初期的高化学计量气云体积后保持一段稳定期再逐渐降低, 各曲线总体呈现一个峰值, 泄漏总量增加会导致最大化学计量气云体积的增加, 但增量较小, 相同泄漏量不同车辆阻塞率下, 泄漏流场形成的化学计量气云体积差异很小. 泄漏

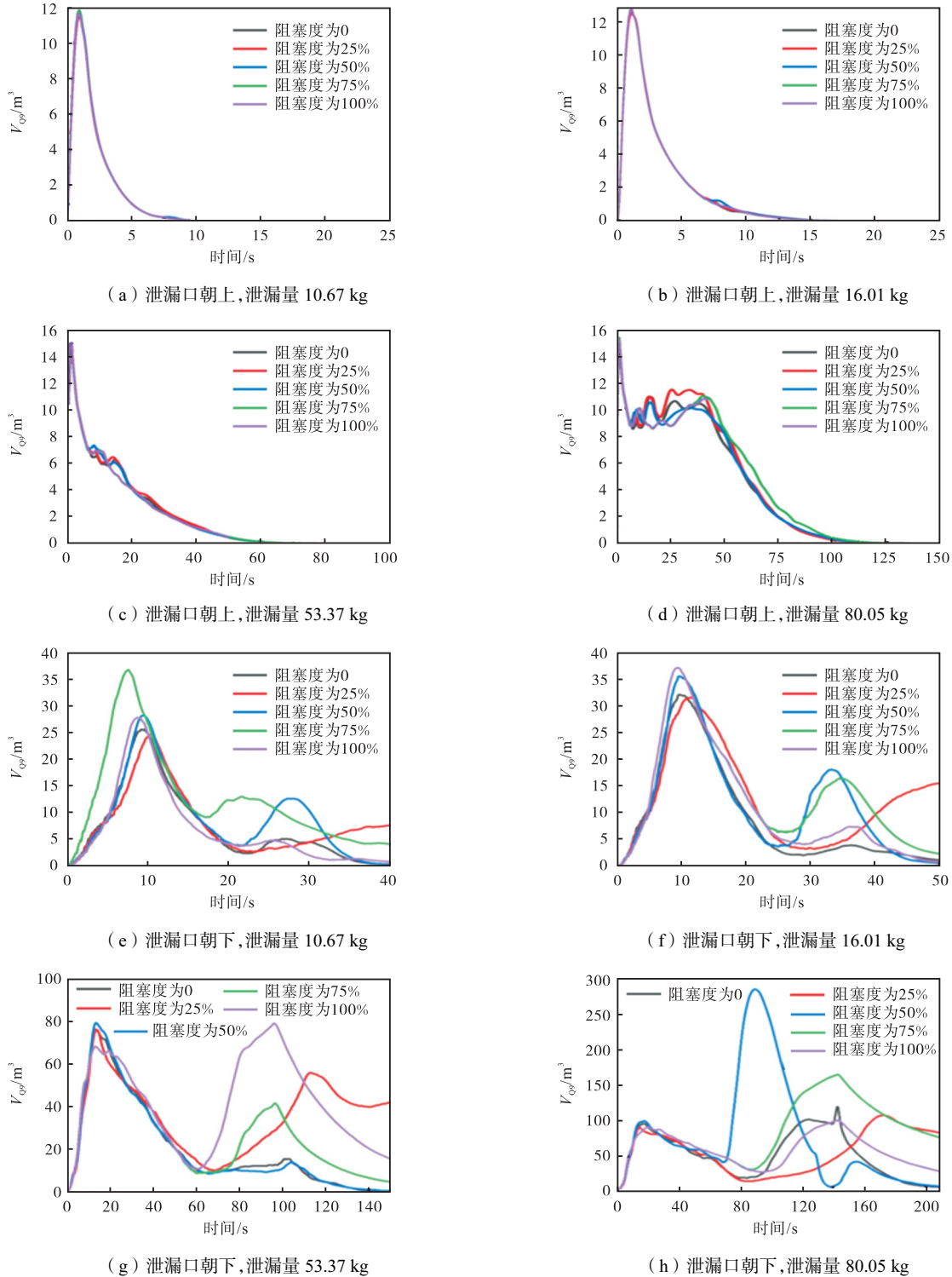


图 13 泄漏过程中形成的等效化学计量气云体积

Fig.13 The volume curve of stoichiometric gas cloud formed during the leakage process

口朝下时,相同泄漏量不同车辆阻塞率下形成的化学计量气云体积曲线表现出差异性,其化学计量气云体积曲线存在两个峰值,第1个峰值是泄漏初期大量的气体泄漏形成的,第2个峰值是泄漏过程中在浮力与初始动量的反作用下泄漏气体扩散过程中形成的。

2.3 障碍物对燃爆后果的影响

利用 FLACS V9.0 浓度场转储方法^[14],基于等效化学计量气云体积曲线中最大峰值时刻的泄漏浓度场分布,设置点火源,重新划分网格进行燃爆数值模拟。模拟中采用立方体均匀网格,经网格独立性验证后选取 0.2 m 的均匀网格开展数值模拟,点火源设置在泄漏源附近可以点燃气云的位置。

根据图 13,当阻塞率等于 50%,泄漏气瓶容量为 600 L 时,形成 Q9 气云体积峰值最大,针对此工况 Q9 气云峰值时刻进行燃爆数值模拟,形成的各时刻爆炸超压分布云图如图 14 所示,在点火发生后 200 ms 内在泄漏源的附近形成高达 90 kPa 的超压,随后膨胀波逐渐向隧道两端移动,在火源的左侧没有车辆障碍物的一端,压力释放不受车辆障碍物的影响,而在点火源的右侧,膨胀波在传播过程中不断受车辆障碍物的影响,传播至车辆附近时超压有从积聚到释放的过程,压力释放速率低于没有障碍物的一端。

此外,所有泄漏工况在等效化学计量气云最大的时刻点火形成的爆炸最大超压如图 15 所示。泄漏口

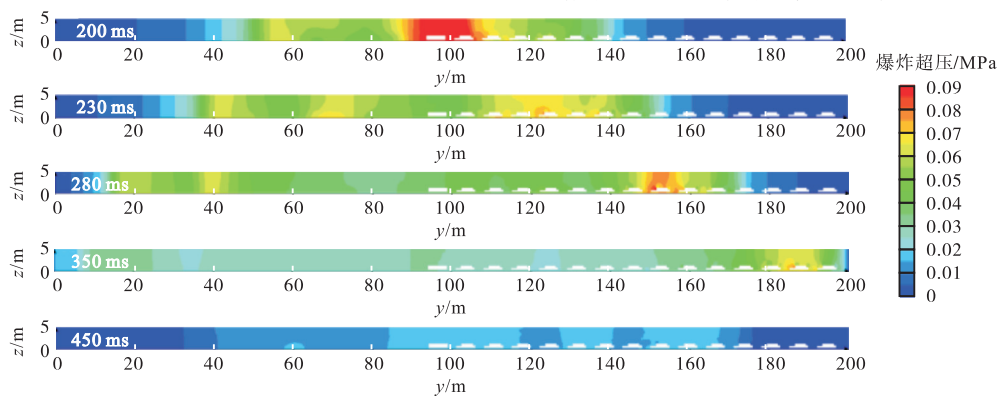


图 14 不同时刻燃爆超压分布

Fig.14 Distribution of explosion overpressure at different moments

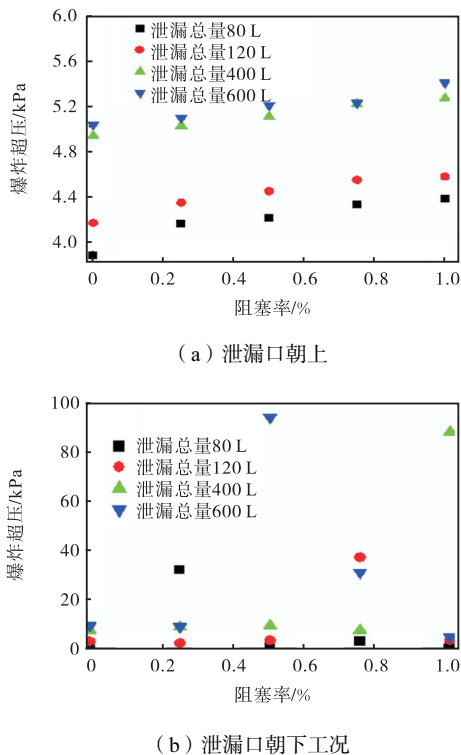


图 15 各工况点火燃爆形成的最大超压

Fig.15 The maximum overpressure formed by ignition and deflagration under various working conditions

朝上时,燃爆后形成的爆炸超压随车辆障碍物的增加有增大的趋势,由于等效气云体积小,车辆障碍物的增加存在不会显著提升超压力,泄漏口朝下时,其形成的最大超压与车辆阻塞率相关性不明显,而较大程度上取决于点火前浓度场的分布。

3 结论

本文采用数值模拟方法,针对车用压缩天然气在隧道内泄漏的典型场景,研究燃气泄漏后在隧道内形成的浓度场演化过程以及点火燃爆形成的超压后果。在本论文的研究范围内可得出以下结论:

(1) 隧道车用压缩天然气泄漏过程中,泄漏口朝上时,泄漏气体初始动量与浮力的共同作用使得泄漏气云相比于泄漏口朝下时更容易在隧道空间中消散。

(2) 隧道车辆障碍物的存在对泄漏口朝上的影响较小,泄漏口朝下时障碍车辆会对积聚在障碍车辆底部的气体向上运动有一定阻滞作用,使等效化学计量气云体积曲线形成两个峰值,并延长整个气体泄漏到消散的时间。

(3) 隧道车用压缩天然气燃爆形成的超压最大

值主要取决于爆炸初期在可燃气云附近形成的超压力,车辆障碍物的存在会延缓超压力的泄放,但总体不会明显增强最大超压数值。

参考文献:

- [1] Li Y Z. Study of fire and explosion hazards of alternative fuel vehicles in tunnels[J]. *Fire Safety Journal*, 2019, 110: 102871.
- [2] Lu H, Huang K, Fu L, et al. Study on leakage and ventilation scheme of gas pipeline in tunnel[J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2018, 53: 347-358.
- [3] Sun W, Yang S, Yang Y, et al. Investigation on the concentration prediction model and personnel hazard range of LNG leakage from tankers in the tunnel[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2023, 172: 700-715.
- [4] Lü H, Shen Y, Zheng T, et al. Numerical study of hydrogen leakage, diffusion, and combustion in an outdoor parking space under different parking configurations[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, 173: 113093.
- [5] Cui S, Zhu G, He L, et al. Analysis of the fire hazard and leakage explosion simulation of hydrogen fuel cell vehicles[J]. *Thermal Science and Engineering Progress*, 2023: 101754.
- [6] Li Z, Luo Y. Comparisons of hazard distances and accident durations between hydrogen vehicles and CNG vehicles[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2019, 44(17): 8954-8959.
- [7] Zhu Y, Wang D, Shao Z, et al. Investigation on the overpressure of methane-air mixture gas explosions in straight large-scale tunnels[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2020, 135: 101-112.
- [8] Groethe M, Merilo E, Colton J, et al. Large-scale hydrogen deflagrations and detonations[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2007, 32(13): 2125-2133.
- [9] Li P J, Chen C S, Chang H P, et al. Explosion mechanism analysis during tunnel construction in the Zengwen Reservoir[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2020, 97: 103279.
- [10] Houf W G, Evans G H, Merilo E, et al. Releases from hydrogen fuel-cell vehicles in tunnels[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2012, 37(1): 715-719.
- [11] 彭新宇, 唐 飞. 横风作用下燃气罐车泄漏射流火行为特征研究[J]. *燃烧科学与技术*, 2023, 29(3): 365-371.
- Peng Xinyu, Tang Fei. Fire behavior characteristics of leakage jet fire of tank under crosswinds[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2023, 29(3): 365-371 (in Chinese).
- [12] 邹 强, 宋尔壮, 雷庆春, 等. 热伴流中甲烷射流的自燃特性研究[J]. *燃烧科学与技术*, 2023, 29(2): 143-149.
- Zou Qiang, Song Erzhuang, Lei Qingchun, et al. Auto-ignition behavior in methane jet-in-hot-coflow flames[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2023, 29(2): 143-149 (in Chinese).
- [13] Birch A D, Hughes D J, Swaffield F. Velocity decay of high pressure jets[J]. *Combustion Science and Technology*, 1987, 52(1/2/3): 161-171.
- [14] Gexcon AS. *FLACS v9.0 User's Manual*[M]. Bergen, Hordaland: Gexcon AS, 2009.