

综合管廊天然气管道泄漏安全研究进展

Progress of Research on Safety of Gas Leakage Diffusion in Utility Tunnel

张智贤¹ 岳墨涵² 张庆增³ 张浩² 王志祥¹

Zhixian Zhang¹ Mohan Yue² Qingzeng Zhang³ Hao Zhang² Zhixiang Wang¹

1. 中国建筑设计研究院有限公司 中国·北京 100044

2. 北京京投城市管廊投资有限公司 中国·北京 100101

3. 中国重汽集团新能源汽车研究院 中国·山东 济南 250000

1. China Architecture Design & Research Group, Beijing, 100044, China

2. Beijing Jingtou City Utility Tunnel Investment Co., Ltd., Beijing, 100101, China

3. Institute of New Energy Vehicles, China National Heavy Duty Truck Group, Jinan, Shandong, 250000, China

摘要: 通过调研综合管廊天然气管道泄漏扩散及安全性的相关研究,分别从泄漏扩散、燃烧爆炸和监控、报警与通风三个方面论述了天然气管道泄漏扩散安全性的国内外研究进展。天然气本身是易燃易爆气体,泄漏后极易导致火灾爆炸事故。因此,不仅要研究天然气管道发生泄漏的安全半径,同时也要研究分析天然气事故后果,重点在于计算分析爆轰破坏半径和火球热辐射半径。研究天然气泄漏扩散规律和扩散半径,对综合管廊天然气舱报警器安装间距、报警响应浓度、紧急切断浓度、降压在线修补提供技术支持,为综合管廊的安全运行提供保障。研究天然气事故后果,为天然气舱的安全管理提供参考依据。

Abstract: Through the investigation of the research on the leakage diffusion of gas pipeline in the utility tunnel, the research progress on the safety of gas pipeline leakage and diffusion is discussed from three aspects: leakage and diffusion, combustion and explosion, monitoring, alarm and ventilation. Because the natural gas is flammable and explosive, it is easy to cause fire and explosion accidents after leakage. Therefore, not only the safety radius of natural gas pipeline leakage is studied, but also the consequences of natural gas accidents is analyzed. The key point is to calculate and analyze the detonation damage radius and fireball thermal radiation radius. The study of diffusion rule and radius of gas leakage can provide technical support for the alarm installation spacing, alarm response concentration, emergency cut-off concentration and step-down online repair in gas compartment. It provides a guarantee for the safety of the utility tunnel. The study on the consequence of natural gas accident can provide reference for the safety management of gas compartment.

关键词: 泄漏; 扩散规律; 燃烧; 监控; 响应浓度

Keywords: leakage; diffusion law; burning; monitoring; concentration of response

基金项目: 京投公司科研项目“天然气管道入廊事故应急处置安全技术研究(项目编号:2020-FZH-02)”。

DOI: 10.12346/etr.v4i9.7052

1 概述

由于腐蚀、第三方损伤或者自然灾害的发生,城市燃气管道可能有不同程度的泄漏,严重时甚至会发生断裂,由此导致火灾或者爆炸。燃气管道敷设于地下,施工难度大,维护成本高,且发生事故时抢修困难。业内人士提出过多种

应急抢修方案决策及泄漏诊断技术,均未能有效解决该类问题^[1]。

为了解决市政管道面临的维护困难问题,综合管廊设计应运而生。卜令方等^[2]通过规划、技术、施工、运营、法规等多方面调研,为天然气纳入综合管廊提供技术支持,提

【作者简介】张智贤(1993-),男,中国山东淄博人,硕士,工程师,从事综合管廊研究。

出了新的建设模式和管理方法。蔡莹^[3]通过实际案例分析了天然气管道在管材选择、焊接方式、防腐涂料、天然气泄漏探测等方面的设计方案。天然气舱有事故发生时,泄漏的天然气及爆炸产生的冲击波可能会对其他舱室甚至地面空间造成破坏。事故的安全等级依次为天然气泄漏扩散、燃烧、爆炸,而监控、报警和通风系统会减少事故的发生和减小灾害。因此,论文对天然气泄漏扩散、燃烧爆炸和监控、报警与通风三方面进行分析梳理,了解天然气管道泄漏扩散安全研究存在的问题及发展方向。

2 天然气泄漏扩散

近年来,国家大力投入发展城市建设,天然气管网总长度增加的同时也为其安全稳定的运行带来巨大挑战。天然气在室外发生泄漏时,能得到及时处理便不会造成太大的危害,但是,如果在某空间中积聚,达到爆炸极限,遇到点火源容易发生火灾,甚至发生爆燃,严重危害人民和社会的安全。通过相关文献的研究整理,论文从数值模拟和实验研究两个方面论述天然气管道泄漏扩散的国内外研究进展。

2.1 数值模拟

Steven R^[4]采用 CFD 对氯气的输送和扩散进行了数值研究,表明泄漏气体的扩散受地形走势影响,地形障碍物会造成气体的积聚。Ebrahimi-Moghadam^[5],程猛猛^[6]等模拟研究泄漏小孔在管道不同位置对泄漏的影响,表明小孔在管道之间比小孔在管道末端的天然气泄漏量大,管道下部泄漏在土壤和空气中的危险范围最大。黄雪驰^[7]通过建立非稳态扩散模型,研究长输天然气架空管道漏口方向、管形对泄漏的影响,得出有风和无风两种情况下不同泄漏压力和天然气浓度时天然气向下泄漏的扩散规律。Guo 等^[8-11]研究了三种环境风速对 CH₄ 扩散的影响,表明环境风速对 CH₄ 扩散有着显著影响,风速越小,气云分布于扩散范围越大,下风向较远距离处能保持较大的浓度峰值;风速越大时情况则相反,越有利于 CH₄ 的扩散。陈炜炜^[12]在射流理论基础上建立了天然气管道泄漏扩散模型,并对其过程进行数值模拟,探究影响天然气泄漏扩散的因素。结果表明,在相同的泄漏速率下,管道内天然气的温度与室温相差越大,天然气泄漏后越向下聚集;在无风状态时,天然气泄漏后主要向上扩散,风速越大泄漏口附近的天然气浓度越小。韩丽^[13]构建了室外真实场景,采用高斯烟羽模型对天然气的扩散进行计算和模拟,基于 ArcGIS 的开发功能在地图上对不同泄漏浓度的范围进行了渲染模拟,论述了影响天然气扩散的主要因素,天然气泄漏的影响范围等,给相关救灾部门的疏散和撤离给予了一定的科学建议。

张承虎等^[14]建立了一段 1 : 1 的天然气管模型,假设泄漏孔为圆形,分析天然气管内泄漏孔分布在排风口水平方向不同距离时,天然气的扩散规律。得到,随着泄漏孔远离排风口,天然气的扩散范围扩大,危险程度也变高。提出了

在管廊进、排风口处设置能够双向通风的风机或者在每个风口处分别安装进、排风两个风机以降低天然气管危险度的建议。马博洋等^[15]模拟计算不同泄漏口大小时管廊的天然气浓度分布,确定天然气管道修作时的管道压力与切断浓度的合理范围,为综合管廊的安全保障运行提供了参考和优化方案。

2.2 实验研究

胡园园^[16]等人利用风洞实验室搭建实验测试装置,以二氧化碳为例,探究室内危险性气体泄漏后的扩散特性及危害区域的影响。吴晋湘^[17]针对可燃气体,在一侧开设通风窗口的房间进行自然通风下气体扩散探究实验得到,燃料浓度随着时间变化先后经历迟滞期和迅速上升期,且扩散迟滞期持续时间随着房间温度的升高而增长。张琼雅^[18]进行了天然气管道气体泄漏速度与泄漏孔径关系的实验测量,泄漏气体的扩散范围与泄漏孔径和管道压力大小呈正相关;建筑物对天然气的扩散有抬升的作用,建筑物的高度只对障碍物顶部以上的区域产生影响;泄漏孔口与建筑物的距离越远,涡流区域越大,射流高度则降低;Liu 等^[19]人采用数值模拟和实验相结合的方法研究三种布局下的天然气泄漏扩散,通过对比分析确定了天然气浓度分布和危险区域天然气扩散的浓度分布与危险区域半径。为应急管理决策遵循意外自然规律提供更可靠的理论依据,预防事故的发生。

Namin 等^[20]对世界多地的管廊内部进行实地测试,统计管廊内温度、湿度、空气质量与微生物含量等参数,并辅以模拟的结果。邓成云等^[21]搭建了管廊天然气泄漏实验台,并通过数值模拟方法研究得到,没有通风时,泄漏的天然气在泄漏口两侧对称扩散并以波峰、波谷的方式呈现;有通风时,气舱夹层不会有天然气积聚,排风井处天然气浓度也不会过高,这一结论为研究天然气泄漏扩散和管廊安全设计都提供了极高的参考价值。袁欣然等^[22]采用数值模拟和实验相结合的方法,研究天然气的泄漏扩散规律及其影响因素。结果显示,随着泄漏孔径的增大,天然气的扩散半径增大,浓度也会变高;防火分区中心出现泄漏时更容易积聚天然气,危险性远高于进风口或出风口附近的泄漏。当天然气发生泄漏,可以采用逐步提高通风速率的方法启动通风系统。该研究结果为天然气泄漏后应对装置的设计提供了有力的技术支持和理论依据。

3 燃烧、爆炸

天然气爆炸是包含多个复杂化学反应的强动力变化过程,威力大、破坏范围广,伴随产生高温高压现象和有毒有害气体,对周围环境和人员造成极大的损害和破坏。根据 GB50838—2015《城市综合管廊工程技术规范》的相关要求,天然气管线纳入综合管廊需要单独设置舱室。因为综合管廊空间有限,易造成泄漏气体积聚达到爆炸浓度范围,而引发事故。相关统计资料显示,2012—2015 年中国共有 3927 起

天然气事故^[23]。所以进行综合管廊天然气泄漏燃烧爆炸的研究,是分析评估天然气管道事故以及应急处理的重要依据,对预防安全事故具有重要意义。由于实验风险较高,研究方法多以采用数值模拟为主。而目前针对综合管廊爆炸的研究较少,可以参照受限空间天然气爆炸的研究成果。

Tran等^[24]数值研究了三维圆柱形中甲烷—空气的爆炸特性,表明甲烷—空气混合在合适当量比时,爆炸威力最大。田诗雅等^[25]研究甲烷在密闭管道发生爆炸时甲烷浓度对冲击波冲量及压力上升速率的影响,当体积分数为9.5%时,甲烷爆炸冲击波冲量及压力上升速率最大。解北京^[26]、赵丹^[27]等对不同类型巷道中甲烷爆炸特性分别进行数值模拟和试验研究,获得了多种类型结构中甲烷爆炸压力及冲击波的传播特征。孟显华等^[28]为进一步明确甲烷浓度及巷道结构对甲烷—空气爆炸特性的影响机制,运用Fluent软件模拟3类典型巷道结构中甲烷空气爆炸过程,对巷道中不同浓度甲烷的爆炸压力变化、火焰传播特性等进行分析,为矿井甲烷爆炸事故的防治工作提供数据支撑。景国勋^[29]实验研究了甲烷煤尘耦合爆炸管道系统中不同煤尘质量浓度与甲烷耦合爆炸冲击波压力的传播特性,为减小煤矿爆炸事故后果和提高安全水平提供理论指导。

姜桦^[30]为了进一步了解真实火灾燃烧情况,试验研究了在不同雾化量的横向风作用下,双喷嘴射流扩散火焰的火焰形态、火焰拉伸长度以及吹熄极限的差异。王宝兴等^[31]提出了抑燃泄压技术,即将燃速较高的可天然气或粉尘与空气的混合气体掺进灭火药剂,使燃烧速率下降,不能产生较高的爆炸压力。同时该技术在三种不同容积的立方体容器内进行了试验,结果表明该方法可有效应用于较大和超长建筑物的防爆。秦文茜^[32]根据实际工程测量爆炸传播管内各参数的变化,发现向管内加入超细水雾可有效延长到达爆炸最大压力的时间,随着加入超细水雾量的增加,甲烷最大爆炸压力和平均升压速率都有明显下降。高建丰等^[33]通过实验和数值模拟研究了受限空间内油气爆炸的过程中组分、湍流对燃烧和压力波发展的影响。实验结果表明油气体积分数分布特性决定了爆炸的发展模式和危险程度,支坑道断面压力波反射叠加造成的局部扰动加剧了湍流,使最大爆炸压力快速上升。仿真结果显示压力波和火焰相互耦合是推动爆炸快速发展的根本动力。

刘希亮等^[34]探讨管廊结构内天然气爆炸冲击波传播特点和其对管廊结构的影响,并根据计算结果指出管廊天然气舱内墙正负压震荡时间持续较长,震荡现象最为明显,更易遭受破坏,其结果为管廊结构抗爆设计提供了参考。孙加超等^[35]通过建立典型三舱室综合管廊模型,对不同爆炸载荷下综合管廊天然气舱内爆炸情况进行数值模拟,获得管廊的破坏模式、天然气舱内空气中心线各点的超压时程曲线以及超压峰值曲线。周庆辉等^[36]通过数值研究,分析了不同泄漏速度和空气流速管廊火灾的变化规律。表明天然气泄漏速

度相同时,适当提高空气流速有利于燃烧,但不能过高;空气流速相同时,泄漏速度也应适当,否则都不利于燃烧。陈宏磊^[37]根据小孔模型,利用FDS对重庆市某综合管廊天然气管道在封闭和通风两种工况下的泄漏火灾进行数值模拟。结果表明,在密闭的管廊内,200 m防火分区的空气仅可燃烧180 s,高温区分布在泄漏口上方,最高温度达1300 °C;通风条件下,因氧气持续供应,最高温度仅840 °C但火灾会持续燃烧并最终从出风口溢出,扩散到其他区域,造成更大危害。这一研究对综合管廊的防火救火等安全设计提供了参考价值。

天然气本身是一种易燃易爆的气体,泄漏后极易引发火灾和爆炸事故。对天然气泄漏事故后果的研究主要是对其热辐射和冲击波伤亡半径的分析。Jo^[38]建立了高压天然气管道破裂时扩散范围大小与泄漏口直径、工作压力和管道长度的简化关系式,该关系是主要基于扩散速率、气体射流和火灾热通量来估算天然气泄漏的受影响范围。这一简化关系式对高压天然气管道的安全管理提供了参考依据。Lowesmith等^[39]将研究重点放在管内物质对火灾后果的影响,首先讨论了高压天然气管道发生火灾事故的后果,管道内的物质设定为不同比例天然气和氢气的混合物,比较了事故后果,认为天然气和氢气的混合物会释放出更高的热辐射,且高压喷射火焰可高达50 m,将造成更大的伤亡。Coccorullo等^[40]提出了一种估测高压管道泄漏后喷射火影响范围的方法,并在不同的物理条件下,比较了不同的天然气介质泄漏引起的火灾事故的严重性。Wang等^[41]对天然气泄漏后的火灾事故进行了模拟,建立了事故模型,并对火焰长度和热辐射进行了计算,对火灾可能影响范围和造成的伤亡人数进行了估测。在天然气火灾和爆炸后果的研究中,中国学者主要研究了两个方面,即等效事故后果的计算和伤亡程度的预测。谷志宇^[42]以高压天然气管道为研究对象,泄漏口直径为150 mm,其他参数按实际检测值模拟,研究表明,在实际工作条件下,管道发生泄漏时的安全半径为200 m。吴峰^[43]将事故后果通过等效转换的方式,以川渝地区某实际项目数据为参考进行了计算了爆轰破坏半径,火球热辐射半径,对天然气管道泄漏事故后果进行量化评价分析,认为天然气会发生爆炸、燃烧的危害非常大。蒋立军^[44]以天然气输气站场作为研究对象,利用实际项目数据计算出伤害半径,并以此为基础对项目提出了有针对性的安全防护建议。

4 监控、报警与通风

天然气管道入廊要保证安全性必须有可靠的监控报警系统,能够及时发现安全隐患,排除事故可能,同时管廊内应有良好的通风系统,当天然气浓度达到一定程度时,自动启动事故排风系统。管廊规范^[45]规定每200米为一个防火分区。

Yang^[46]等人主要研究了小波变换的性质和其在检测天然气泄漏定位中的效果和潜在价值,提出了一种精确确认泄

漏点的方法。Liu^[47]等根据声学方法的基本原理,对泄漏声波的传播模型进行了修正,研究了天然气管道泄漏的检测与定位,基于传播规律提出了一种全新的、更有效的管道检测和泄漏点定位方法。

周宁等^[48]对地下综合管廊的天然气管道泄漏在无风和有风两种情况下的过程进行数值模拟,由计算结果提出天然气泄漏过程云团的运动轨迹和分布浓度、涡对及涡团的运动以及上、下风向区域可天然气体报警时间的长短都受到风速的较大影响。方自虎等^[49,50]设计了以甲烷为实验气体的不同长度不同材质的天然气共同沟模型泄漏实验,针对天然气舱可能出现的天然气泄漏问题进行研究,根据实验结果建立了天然气含量达到50%爆炸极限下限的报警响应时间计算公式。以深圳综合管廊为原型,模拟了综合管廊内向上和向左泄漏口的天然气扩散分布情况。并将浓度分布转化为天然气报警器探头报警时间,发现距离泄漏口一定的范围内,天然气浓度与泄漏口的方向无关,为报警探头安装在管廊内顶部提供了参考^[51]。

胡敏华以深圳的某天然气共同沟为例^[52],设计不同比例断面尺寸和长度的实验台,分析得出了天然气探测器报警响应时间的经验公式,表明单宽泄漏值越大,报警响应时间越短。钱喜玲等^[53]对西安市某一地下综合管廊天然气舱进行建模和分析,探讨了不同泄漏压力对报警器响应时间的影响。结果显示报警响应时间随着泄漏压力的增大而减小,而在相同天然气管道压力下,报警器的响应时间与报警器浓度的设置没有太大关系。赵卫民等^[54]设计了一种安全可靠的室内天然气泄漏自动报警系统,人们使用该系统可以通过远程计算机实时的了解室内的天然气浓度,并控制防爆风机进行排气,达到安全的效果。

程玉超^[55]通过数值模拟对危险作业场所的气体泄漏过程进行分析,结果表明,相比其他气体探测器,氧气探测器反应更灵敏,建议在危险区域使用氧气报警系统,另外,可以通过设计恰当的防爆风机及时排出泄漏气体,使泄漏的危险气体浓度低于爆炸极限下限。郝卿儒^[56]以某实际综合管廊为原型,以1:5的尺寸搭建综合管廊天然气泄漏预警及响应实验台,研究天然气泄漏扩散规律和扩散半径,对综合管廊天然气舱报警器安装间距、报警响应浓度、紧急切断浓度、降压在线修补等进行研究,为综合管廊的安全运行提供保障。

天然气的廊外排出与通风系统以及管廊通风口处的风亭有关。林欣欣^[57]针对北京市延庆区管廊项目提出加长通风分区、改变风机安装位置、调整风亭高度的方案满足实际工程与美观的需要。董骥等^[58]根据北京市某综合管廊的工程项目,对管廊的电力舱进行了计算和模拟,探讨管廊温度受通风方式的影响,根据模拟结果对管廊风亭的设计进行了优化。刘承东^[59]等人对某已建综合管廊工程进行回访,并对风亭的外观体量和通风区段进行了优化。胡可昕^[60]对事故

通风时天然气在风亭周围的扩散进行了数值模拟,并根据计算结果提出平顶式风亭比坡顶式风亭对于泄漏天然气的扩散效果更好,且相同条件下风亭高度与泄漏天然气扩散范围呈线性关系。这些研究为实际综合管廊工程优化风亭设计,强化通风排烟提供了一定的科学依据。

5 结论

综合管廊天然气舱的安全性不仅要研究泄漏扩散、燃烧、爆炸等安全事故,也要研究相应的监控、报警和通风系统以减少事故的发生和减小事故灾害,主要归纳为以下几个方面:

①研究管廊出现天然气泄漏时的天然气浓度分布以及天然气泄漏的影响范围,给疏散和撤离给予一定的科学建议。

②研究天然气管道发生泄漏安全半径的同时,也要研究分析爆轰破坏半径和火球热辐射半径。研究天然气事故后果,为天然气舱的安全管理提供参考依据。

③研究综合管廊天然气舱报警器安装间距及报警响应浓度,为综合管廊的安全运行提供保障。结合实际综合管廊工程优化风亭设计,以强化通风排烟,为预防重大事故发生提供一定的科学依据。

参考文献

- [1] 张书豪,彭世尼,杜建梅,等.国内综合管廊天然气舱安全研究综述[J].实验室研究与探索,2019,39(11):1-9.
- [2] 卜令方,汪明元,金忠良,等.中国城市综合管廊建设现状及展望[J].中国给水排水,2016,32(22):57-62.
- [3] 蔡莹.综合管廊中纳入天然气管道的设计思考[J].上海煤气,2016(2):27-31.
- [4] Steven R. Hanna, Olav R. Hansen, Mathieu Ichard, et al. CFD model simulation of dispersion from chlorine railcar releases in industrial and urban areas[J]. Atmospheric Environment,2009,43(2):262-270.
- [5] Ebrahimi-Moghadam A, Farzaneh-Gord M, Deymi-Dashtebayaz M. Correlations for estimating natural gas leakage from above-ground and buried urban distribution pipelines[J]. Journal of natural gas science and engineering,2016(34):185-196.
- [6] 程猛猛,吴明,赵玲,等.城市埋地天然气管道泄漏扩散数值模拟[J].石油与天然气化工,2014,43(1):94-98.
- [7] 黄雪驰,马贵阳,杨奇睿,等.天然气管道非稳态泄漏扩散的数值模拟[J].安全与环境学报,2017,17(1):183-188.
- [8] Dongpeng Guo, Peng Zhao, Ran Wang, et al. Numerical simulation studies of the effect of atmospheric stratification on the dispersion of LNG vapor released from the top of a storage tank[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries,2019(61):275-286.
- [9] Dongpeng Guo, Peng Zhao, Ran Wang, et al. Numerical simulations of the flow field and pollutant dispersion in an idealized urban area under different atmospheric stability conditions[J]. Process Safety and

- Environmental Protection,2020(136):310-323.
- [10] Dongpeng Guo, Peng Zhao, Rentai Tao, et al. Numerical and Wind Tunnel Simulation Studies of the Flow Field and Pollutant Diffusion around a Building under Neutral and Stable Atmospheric Stratifications[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology,2019(58):2405-2420.
- [13] Dongpeng Guo, Peng Zhao, Ran Wang. Numerical Simulation of the Flow Field and Pollutant Dispersion around a Hill under Different Thermal Stratifications[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology,2019(59):47-64.
- [12] 陈炜炜.基于FLUENT的加臭天然气泄漏扩散研究[D].马鞍山:安徽工业大学,2019.
- [13] 韩丽,时盛春,熊兴军.基于Arc GIS的室外天然气扩散分析及模拟[J].价值工程,2016,35(21):3.
- [14] 张承虎,田贯三.综合管廊天然气舱内天然气泄漏扩散数值模拟[J].煤气与热力,2019,39(7):23-25.
- [15] 马博洋,许淑惠,李磊,等.综合管廊天然气舱天然气泄漏安全响应研究[J].消防科学与技术,2020,39(6):852-856.
- [16] 胡园园,王志荣,蒋军成.自然通风条件下室内CO₂扩散浓度变化的数值模拟[J].南京工业大学学报(自然科学版),2012,26(5):693-696.
- [17] 吴晋湘,张丽娟,刘立辉,等.室内可天然气体泄漏后浓度场变化的实验研究[J].消防科学与技术,2005(2):169-171.
- [18] 张琼雅.城镇天然气管道泄漏扩散的CFD模拟及后果分析[D].重庆:重庆大学,2013.
- [19] Liu, A., Huang, J., Li, Z, et al. Numerical simulation and experiment on the law of urban natural gas leakage and diffusion for different building layouts[J]. Journal of natural gas science and engineering, 2018(54):1-10.
- [20] Namin F S, Ghafari H, Dianati A. New Model for Environmental Impact Assessment of Tunneling Projects [J]. Journal of Environmental Protection, 2014,5(6):530-550.
- [21] 邓成云,崔海龙,李跃飞,等.综合管廊天然气舱天然气泄漏模型实验研究[J].市政技术,2020,38(2):209-214.
- [22] 袁欣然,许淑惠,徐荣吉,等.综合管廊天然气舱天然气管道泄漏扩散规律研究[J].消防科学与技术,2019,38(6):802-806.
- [23] 刘爱华,黄检,吴卓儒,等.城市天然气管道状况及天然气事故统计分析[J].煤气与热力,2017,37(10):27-33.
- [24] Tran M V, Scribano G, Ceng T C, et al. Simulation of explosion characteristics of syngas/air mixtures[J]. Energy Procedia,2018(153):131-136.
- [25] 田诗雅,刘剑,高科.密闭管道瓦斯爆炸冲击波冲量及压力上升速率的实验研究[J].中国安全生产科学技术,2015,11(8):16-21.
- [26] 解北京,杜玉晶,王亮.分岔管道内瓦斯爆炸火焰传播规律实验及数值模拟[J].重庆大学学报,2019,42(6):69-77.
- [27] 赵丹,齐昊,潘竞涛,等.不同类型管道内瓦斯爆炸冲击波传播试验研究[J].中国安全科学学报,2018,28(3):79-83.
- [28] 孟显华,谢岩森.甲烷体积分数及巷道结构对甲烷爆炸特性影响研究[J].中国安全科学学报,2021,31(12):136-142.
- [29] 景国勋,彭乐,班涛,等.甲烷煤尘耦合爆炸传播特性及伤害研究[J].中国安全科学学报,2022,32(1):72-78.
- [30] 姜桦,刘长春,黄林远,等.含水雾横向风作用下双喷口射流扩散火焰特性[J].中国安全科学学报,2022,32(1):157-163.
- [31] 王宝兴,黄伟,李景成.超长(大)建筑物的抑燃泄压试验研究[J].工程热物理学报,2000(2):252-256.
- [32] 秦文茜.超细水雾抑制含障碍物甲烷爆炸的实验研究[D].合肥:中国科学技术大学,2011.
- [33] 高建丰,杜扬,周琳莉.地下组合受限空间油气爆炸实验与数值模拟研究[J].热科学与技术,2007,6(4):352-362.
- [34] 刘希亮,李焯,王新宇,等.地下管廊在天然气爆炸作用下的动力响应分析[J].高压物理学报,2018,32(6):68-75.
- [35] 孙加超,邓勇军,姚勇,等.综合管廊天然气仓内爆炸下冲击波衰减规律研究[J].爆破,2018,35(3):35-41.
- [36] 周庆辉,肖龙,白宗杰,等.多工况下综合管廊天然气泄漏致火灾温度场分析[J].北京建筑大学学报,2020,36(3):51-56.
- [37] 陈宏磊.基于FDS的综合管廊天然气泄漏火灾特性研究[J].福建建设科技,2017(4):30-32.
- [38] JO Y.D, AHN B J. Analysis of hazard areas associated with high-pressure natural-gas pipelines [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries,2002,15(3):179-188.
- [39] Lowesmith B J, Hankinson G. Large scale experiments to study fires following the rupture of high pressure pipelines conveying natural gas and natural gas/hydrogen mixtures [J]. Process safety & environmental protection,2013(91):1-2.
- [40] Coccorullo I, Russo P. Jet fire consequence modeling for high-pressure gas pipelines[C]. International Conference of Computational Methods in Sciences and Engineering 2016 (ICCMSE 2016)//AIP Conference Proceedings. Washington, D. C. AIP Publishing,2016.
- [41] Wang S, Li J, Wu F, et al. Fire accident assessment of leaking natural gas from pipelines[C].International Conference on Pipelines and Trenchless Technology,2014.
- [42] 谷志宇,董绍华,牛景弘,等.天然气管道泄漏后果影响区域的计算[J].油气储运,2013,32(1):85-87.
- [43] 吴峰,王锐.天然气管道泄漏事故后果量化评价分析[J].煤气与热力,2012,32(5):34-36.
- [44] 蒋立军,刘峰,高震,等.PHAST软件在输气站场泄漏事故后果评估中的应用[J].当代化工,2015,44(2):292-294.
- [45] GB 50838—2015 城市综合管廊工程技术规范[S].北京:中国计划出版社,2015.
- [46] Yang Z, Xiong Z, Shao M. A new method of leak location for the natural gas pipeline based on wavelet analysis [J].

- Energy,2010,35(9):3814-3820.
- [47] Liu C W, Li Y X, Fu J T, et al. Experimental study on acoustic propagation-characteristics-based leak location method for natural gas pipelines [J]. Process Safety & Environmental Protection,2015(96):43-60.
- [48] 周宁,任福平,陈兵,等.风速对综合管廊天然气管道泄漏扩散影响的数值模拟[J].天然气化工—C1化学与化工,2020,45(2):100-105.
- [49] 方自虎,蔺宏,黄鹤,等.管廊内天然气泄漏扩散的模型试验与数值仿真[J].工程力学,2006,23(9):189-192.
- [50] 方自虎,王家远,刘建.共同沟内天然气泄漏报警响应时间的试验研究[J].石油工程建设,2006,32(1):13-16.
- [51] 方自虎,王家远.共同沟内天然气扩散规律的数值分析[J].武汉大学学报(工学版),2009,42(2):215-218.
- [52] 胡敏华.共同沟天然气管道泄漏报警实验研究[J].深圳大学学报(理工版),2006,23(3):211-216.
- [53] 钱喜玲,闫小燕,赵江平.地下综合管廊天然气管道泄漏扩散模拟研究[J].中国安全生产科学技术,2017(11):85-89.
- [54] 赵卫民,张体明.易燃易爆气体泄漏报警系统的设计[J].实验室研究与探索,2016,35(10):60-63.
- [55] 程玉超.危险作业场所气体泄漏数值模拟分析[J].中国公共安全:学术版,2013(1):61-65.
- [56] 郝卿儒.地下综合管廊天然气管道泄漏预警及响应研究[D].北京:北京建筑大学,2019.
- [57] 林欣欣.综合管廊通风设计实例及问题探讨[J].建筑热能通风空调,2019,38(5):80-82+85.
- [58] 董曦,胡秦疆,郑奕.综合管廊的通风效果模拟及风亭的优化[J].建筑热能通风空调,2008,37(5):62-65.
- [59] 刘承东,唐宏辉,谢艺强,等.城市综合管廊通风系统风亭设计及优化[J].中国市政工程,2016(S1):91-94+120-121.
- [60] 胡可昕.综合管廊天然气舱事故通风系统的研究[D].济南:山东建筑大学,2020.