

# 浅谈城市浅埋管沟燃气爆炸研究现状与不足

戴君豪

陆军工程大学

**摘要:** 鉴于燃气爆炸事故的危害性, 现阶段城市浅埋管沟的设计中尚未考虑爆炸等相关因素的影响, 关于管沟燃气爆炸的研究还不够系统和深入。本文从实验研究、数值模拟研究和理论研究三个方面总结了国内外管沟燃气爆炸荷载研究现状, 指出了现有研究不足以及往后的研究趋势, 以期城市浅埋管沟的建设提供参考。

**关键词:** 浅埋管沟; 燃气爆炸

【DOI】 10.12254/j.issn.2096-6539.2023.08.116

## 引言

随着我国能源消费结构逐渐低碳化, 天然气消费在我国能源结构中的占比逐年增加。为了综合利用城市空间, 大部分天然气管道埋设于城市地下。由于地下环境恶劣, 天然气管道往往受到严重的腐蚀, 如果没有及时做好管道防腐处理以及监测管理等保护工作, 极有可能出现严重的天然气泄漏事故。因为天然气的燃点较低, 一旦泄漏的天然气遇到合适的点火源将会发生燃烧、爆炸等事故。

燃气爆炸是一种典型的非理想爆炸, 按照爆炸所处的环境可以分为开敞空间爆炸和泄爆空间爆炸。城市浅埋管沟内部发生的燃气爆炸属于泄爆空间爆炸, 其内部配备的排水口、通风口等均能成为泄爆窗口。由于爆炸冲击波荷载传播速度快、范围广、伤害高, 所以爆炸波从泄爆口传至地表后极易造成人体耳膜和肺部的伤害。如2014年8月1日凌晨, 台湾地区高雄市前镇、苓雅、小港等区, 由于管线长期处于潮湿环境中遭到严重的腐蚀, 导致地下丙烯管道泄漏至侧沟, 并且沿着下水道蔓延, 在相对密闭的空间内堆积, 在当地消防人员查找丙烯泄漏源期间, 遇火源突然发生连环爆炸, 火球冲出高度超过9米, 事故共造成32人死亡, 321人受伤, 其中消防人员6人死亡, 22人受伤。因此, 开展城市浅埋管沟燃气爆炸荷载传播及分布规律的研究, 对城市浅埋管沟的结构设计、防爆防护以及风险评估等具有重要的指导意义, 有助于最大化减少此类爆炸事故的发生并降低其伤害程度, 具有重要的学术研究和工程应用价值。

## 一、浅埋管沟简介与建设

城市浅埋管沟是指埋设于城市地下空间的小型长直空间构筑物及附属设施, 如图1所示: 主要包括城市给

排水管沟系统、用于敷设市政公用设施管线的暗沟以及城市地下小型涵洞等。它是城市整体规划中一个重要的组成部分, 主要负责城市水资源调配以及地下管线的统筹管理。随着城市现代化建设的推进, 我国城市浅埋管沟建设迅速发展, 突破了传统的思维以及建设方式, 采用新型的结构形式以及建筑材料, 适应性更加突出。与城市地下综合管廊和综合管沟相比, 浅埋管沟的截面尺寸相对较小, 施工工艺简单、建设成本低, 是目前我国城市最常见的地下公用基础设施。

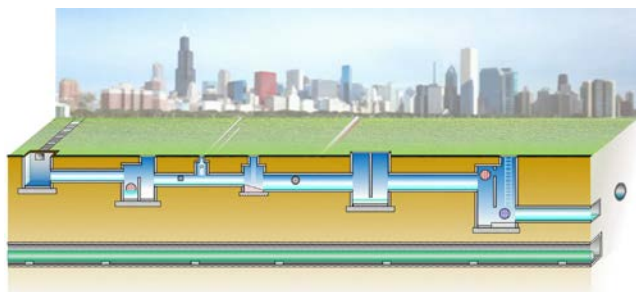


图1 各类浅埋管沟示意图

城市浅埋管沟的布置综合考虑了地下水文条件、地形、土质、道路情况、施工条件、其他地下设施以及养护管理等因素。排水管渠的位置应该便于雨水、污水汇集, 一般与道路中心线平行布置, 浅埋于非机动车道或人行道下, 地形受限时可以根据实际位置布置于机动车道或者绿化带下; 当管线与公路、铁路存在线路交叉时常采用垂直布置的方式。管沟的断面形式丰富多样, 包括: 矩形、圆形、梯形、椭圆形、V形、马蹄形等。进行设计时主要考虑设计流量、埋设深度、地形环境、施工水平、经济水平等。圆形管道的排水性能优越, 相同断面面积对应更大的水力半径, 结构形式简单, 便于预制, 多采用预制管道现场安装的施工方式。梯形断面适用于明渠, 它的边坡取决于土壤性质和铺砌材料, 常用于路边排水沟建设, 受地理环境限制, 实际施工过程中也可以添加盖板浅埋至地下。矩形截面既可以采用预制的方式, 也可以采用现场浇筑或者砌筑的施工方式, 适用于复杂的地形条件, 便于维修和养护。除了常见的几类管道, 为了适应市政管线的建设需求, 更多特殊形状的成品管沟开始运用于生活中, 促进了管沟建设的综合性发展。

城市浅埋管沟的材料通常需要综合考虑市政管线规

划、地下环境以及施工方式等因素。现浇管沟的主体材料为钢筋混凝土，施工采用的建筑材料包括烧结普通机制砖、石料、混凝土块、砌筑砂浆等；预制管道常采用混凝土、钢筋混凝土、钢材、铸铁等材料。随着工艺的进步，各种新型塑料管材在工程应用中发展迅猛，先后开发出了聚氯乙烯管、聚乙烯管、玻璃钢夹砂管、钢塑复合管、铝塑复合管、交联聚乙烯管、聚丙烯管、氯化聚氯乙烯管、工程塑料管等新型材料管道。由于钢筋混凝土矩形管沟的相关施工技术已十分成熟，而且这类管沟具有适用性广、工程造价低、施工形式多和便于综合管理等优点，所以现阶段我国城市地下管沟仍以钢筋混凝土矩形管沟为主。

管沟系统的附属构筑物包括：检查井、跌水井、水封井、雨水口、截流井、排水口等，具体设计参考国标图集《市政排水管道工程及附属设施（06MS201）》。为了防止暗沟中的油污与外界气体相通从而引发火灾，一般废水排水口附近以及管道中间每隔250m设置水封井。当管道落差较大，且不能够通过调节坡度来解决时，一般设置有跌水井。污水管道中还设有截流井进行污水集中处理，还可以对雨季和旱季的雨水、污水进行分离截流。在管道交汇处、转弯处、管径或坡度改变处、跌水处以及直线管段上每隔一定距离处还应该设置检查井。

## 二、城市浅埋管沟燃气爆炸研究现状

### （一）实验研究

基于煤矿巷道瓦斯爆炸和输油管道爆炸等事故背景，国内学者选取不同可燃气体已开展了一些长直空间爆炸试验。试验中最常见的可燃气体以瓦斯和甲烷为主，试验装置主要为尺寸较小的方形和圆形管道，这类试验一般可以在室内开展，也有个别试验在大尺寸掘进巷道中开展。王东武<sup>[1]</sup>等在长 $L=896\text{m}$ 、截面积 $S=7.2\text{m}^2$ 的大尺寸独头巷道中进行了瓦斯爆炸试验，研究了瓦斯爆炸传播规律以及瓦斯体积对爆炸荷载的影响。徐景德等<sup>[2]</sup>在长 $L=518.16\text{m}$ 、截面积 $S=5\text{m}^2/7.54\text{m}^2$ 的梯形巷道中也进行了瓦斯爆炸试验，研究了瓦斯浓度、点火位置以及点火源数量对瓦斯爆炸荷载的影响，分析了尺寸效应对瓦斯爆炸传播的影响。

国外学者基于长直空间内可燃气体爆炸事故背景也开展了爆炸试验，主要以圆形管道为主，整体尺寸也偏小，试验选取的可燃气体主要为甲烷，也有部分学者根据实际情况选取了氢气、瓦斯等气体。Proust等<sup>[3]</sup>在长径比为3.5、体积为 $100\text{m}^3$ 的矩形截面管道中进行了甲烷/空气混合气体内部以及外部二次点火爆炸试验，研究了不同泄爆口面积下管道内、外荷载规律。Groethe等<sup>[4]</sup>在

长 $L=78.5\text{m}$ 、截面积 $S=3.74\text{m}^2$ 的隧道中进行了氢气爆炸试验，研究了不同浓度的氢气在有、无障碍物情况下的爆炸荷载特征。

### （二）数值模拟研究

由于爆炸试验难度大而且成本高，部分学者采用数值模拟的方法对可燃气体爆炸进行了分析。江丙友<sup>[5]</sup>等采用AutoReaGas软件对独头巷道中的瓦斯爆炸进行了数值模拟，研究了点火位置、巷道尺寸等因素对爆炸后果的影响，并且分析了爆炸波在巷道中的传播规律。Janovsky等<sup>[6]</sup>在长 $L=300\text{m}$ 、截面积 $S=10.2\text{m}^2$ 的矿井中进行了瓦斯爆炸试验，研究了AutoReaGas在不同壁面粗糙度巷道中的模拟方法并进行了参数修正。Michele等<sup>[7]</sup>通过AutoReaGas软件对不同管道系统内的气体爆炸过程进行模拟，对比分析了变截面连通管道和单个管道内爆炸的区别。郭强<sup>[8]</sup>等采用FLUENT软件对开口、封闭管道中的可燃气体爆炸进行数值模拟，研究了泄爆面积、管道结构、阻塞条件等对爆炸压力以及火焰发展的影响。陈晓坤等<sup>[9]</sup>利用FLACS软件对独头巷道瓦斯爆炸进行了数值模拟，研究了瓦斯浓度及障碍物条件对爆炸荷载的影响。王涛等<sup>[10]</sup>通过FLACS对在小尺寸玻璃管道内的甲烷爆炸进行模拟分析，研究了不同甲烷浓度下的火焰传播速度以及火焰长度。

### （三）理论研究

基于爆炸试验以及数值模拟数据，部分学者对爆炸规律进行了理论分析。杨书召等<sup>[11-12]</sup>基于爆炸气体动力学研究了巷道中的瓦斯爆炸传播规律，通过理论分析了爆炸冲击波气流在巷道中的衰减规律，并建立爆炸超压、气流伤害模型，结果表明：爆炸超压和气流传播速度与爆炸初始能量成正比，与传播距离及截面积的平方根成反比的关系。王海燕<sup>[13]</sup>、曲志明<sup>[14]</sup>、程五一<sup>[15]</sup>、朱邵飞<sup>[16]</sup>等结合弱冲击波理论，通过爆炸释放的能量提出了瓦斯爆炸超压沿管道传播方向的衰减关系。许浪<sup>[17]</sup>、王省身<sup>[18]</sup>等按照量纲一致的原理，对大尺寸巷道瓦斯爆炸试验结果进行回归分析，建立了巷道瓦斯爆炸超压和冲击波速度衰减模型。王振成等<sup>[19]</sup>通过回归分析法对管状容器丙烷泄爆试验数据进行归纳，拟合得到不同容积容器的超压峰值与开口比的关系式，并且得到密闭管状容器的超压时程曲线计算公式。刘涛等<sup>[20]</sup>根据爆炸相似理论，建立了掘进巷道瓦斯爆炸冲击波超压与瓦斯-空气混合气体体积、浓度以及传播距离之间关系的预测模型。

## 三、结论

城市浅埋管沟燃气爆炸包含了复杂的物理化学过程、热力学过程以及热传导过程等，影响因素众多。虽

然部分学者通过研究取得了丰硕的成果，但是仍然存在许多不足之处，主要表现在以下几个方面：

(1) 管沟燃气爆炸基础性试验数据缺乏。目前，大部分相关空间的气体爆炸试验主要集中于小尺寸管道内，而且研究内容多为爆炸机理、火焰形状变化和火焰传播过程；另外由于爆炸试验装置往往经过了一定的简化缩比，与实际管沟结构差异较大，所以大部分研究成果适用范围有限，在结构复杂的大尺寸管沟中运用性能的可靠性还需要进一步验证。

(2) 管沟燃气爆炸荷载计算方法有待完善。现有类似管沟空间的燃气爆炸研究中，由于爆炸试验装置尺寸较小，基础数据较少，爆炸荷载的计算难度较大，包括超压时程曲线的规律、爆炸超压和冲量、升压速度、超压持续时间等方面的研究则更少，部分学者通过理论分析和经验公式拟合的方法得到荷载衰减模型，但是由于过度简化且缺少必要的试验验证，理论模型的适用范围受到了限制。

(3) 数值模拟软件的可靠性有待验证。

近年来，计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)分析技术日益成熟，越来越多的CFD软件出现在大家的视野中，比如：FLACS、AutoReaGas、Fluent等。虽然部分软件已经通过某些经典试验数据进行了验证，但是由于燃气爆炸受爆炸场景影响非常大，而且软件中各计算参数的选取往往是由开发者通过大量试验标定的，具有很大的经验性和不确定性，所以需要进一步验证管沟燃气爆炸场景下模拟结果的准确性。

### 参考文献

[1] 王东武, 杜春志. 巷道瓦斯爆炸传播规律的试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2009, 26(04): 475-480+485.

[2] 徐景德. 矿井瓦斯爆炸冲击波传播规律及影响因素的研究[D]. 中国矿业大学(北京), 2003.

[3] 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.

[4] Mohammed J. Ajrash, Jafar Zanganeh, Behdad Moghtaderi. Flame deflagration in side-on vented detonation tubes: A large scale study[J]. Journal of Hazardous Materials, 2018, 345.

[5] 江丙友, 林柏泉, 朱传杰, 等. 瓦斯爆炸冲击波在并联巷道中传播特性的数值模拟[J]. 燃烧科学与技术, 2011, 17(3): 250-254.

[6] Janovsky B, Selesovsky P, Horkel J, et al. Vented confined explosions in Stramberk experimental mine and AutoReaGas simulation[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2006, 19(2-3): 280-287.

[7] Michele Maremonti et al. Numerical simulation of gas explosion in linked vessels. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 1999, (12): 189-194.

[8] 郭强, 王明洋, 高康华, 赵天辉, 孙松. 方形空间可燃气体爆燃泄爆实验及三维数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击, 2018, 38(05): 1099-1105.

[9] 陈晓坤. 独头巷道瓦斯爆炸的数值模拟[J]. 煤矿安全. 2012, 43(7): 20-22.

[10] 王涛. 管道内甲烷爆炸特性及CO<sub>2</sub>抑爆的实验与数值模拟研究[D]. 西安科技大学, 2014.

[11] 杨书召. 受限空间煤尘爆炸传播及伤害模型研究[D]. 河南理工大学, 2010.

[12] 杨书召, 景国勋. 半封闭受限空间瓦斯爆炸传播[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科版), 2014, 33(01): 28-32.

[13] 王海燕, 曹涛, 周心权等. 煤矿瓦斯爆炸冲击波衰减规律研究与应用[J]. 煤炭学报, 2009, 34(6): 778-782.

[14] 曲志明, 周心权, 王海燕等. 瓦斯爆炸冲击波超压的衰减规律[J]. 煤炭学报, 2008, 33(4): 410-414.

[15] 程五一, 刘晓宇, 王魁军等. 煤与瓦斯突出冲击波波阵面传播规律的研究[J]. 煤炭学报, 2004, 29(1): 57-60.

[16] 朱邵飞, 叶青, 李贺, 贾真真, 沈子鹤, 杨卓华. 巷道空间内瓦斯爆炸冲击波传播的数值模拟[J]. 矿业工程研究, 2019, 34(03): 23-30.

[17] 许浪. 瓦斯爆炸冲击波衰减规律及安全距离研究[D]. 中国矿业大学, 2015.

[18] 王省身, 谢之康. 矿井沼气爆炸的安全距离探讨[J]. 煤炭学报, 1989, 18(4).

[19] 王振成, 小川辉繁. 管状容器的泄压[J]. 工业安全与防尘, 1995(01): 13-16.

[20] 刘涛, 贾进章. 煤矿掘进巷道内瓦斯爆炸冲击波的超压预测[J]. 矿业安全与环保, 2017, 44(5): 18-20.