

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20211019005

城市地下工程典型爆炸危险源辨识*

舒奕展^{1,2}, 王高辉^{1,2}, 卢文波^{1,2}, 陈明^{1,2}, 卢昂^{1,2}, 余晨³

(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072; 2. 武汉大学水工岩石力学教育部重点实验室, 湖北 武汉 430072; 3. 中建丝路建设投资有限公司, 陕西 西安 710075)

摘要:二十一世纪, 在国内外飞速发展的城市地下工程施工和运营过程中, 突发爆炸事件频频发生, 造成巨大的人员伤亡和严重的财产损失。本文研究了城市地下工程典型爆炸危险源, 整理已有的爆炸危险源分类方法, 提出针对城市地下工程典型爆炸危险源的分类方法。分析了城市地下工程爆源的空间分布特征, 描述了城市地下工程突发爆炸的可能位置。同时给出了城市地下工程各类爆炸的发生原因, 分析了城市地下工程典型突发爆炸的诱发机理及条件, 总结了对应的预防措施。本文针对城市地下工程典型爆炸危险源进行辨识, 期望帮助企业 and 政府做好预防措施和应急预案, 降低城市地下工程爆炸事故的发生率。

关键词: 城市地下工程; 爆炸危险源; 分类方法; 空间分布; 诱发机理

中图分类号: X932 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2023)02-0294-07

Identification of Typical Explosion Hazards in Urban Underground Engineering

SHU Yizhan^{1,2}, WANG Gaohui^{1,2}, LU Wenbo^{1,2}, CHEN Ming^{1,2}, LU Ang^{1,2}, YU Chen³

(1. State Key Laboratory of Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Key Laboratory of Rock Mechanics in Hydraulic Structural Engineering, Ministry Of Education, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. China State Construction Silk Road Construction Investment Group co., LTD, Xi'an 710075, China)

Abstract: In the 21st century, with the rapid development of urban underground engineering construction and operation at home and abroad, sudden explosions occur frequently, causing huge casualties and serious property losses. This paper studies the typical explosion hazards of urban underground engineering, sorts out the existing classification methods of explosion hazards, and puts forward a classification method for typical explosion hazards of urban underground engineering. This paper analyzes the spatial distribution characteristics of explosive sources, and describes the possible locations of sudden explosions in urban underground engineering. At the same time, this paper gives the causes of all kinds of explosions in urban underground engineering, analyzes the triggering mechanisms and conditions of typical sudden explosions in urban underground engineering, and summariz-

* 收稿日期:2021-10-19;修回日期:2022-01-25

基金项目:国家自然科学基金(52179140,51939008)、湖北省自然科学基金杰出青年项目(2021CFA093)、武汉市应用基础前沿项目(2020020601012282)资助

作者简介:舒奕展(1995—),男,博士研究生。主要从事爆炸毁伤效应及安全评估工作。E-mail:syz_whu@163.com

通讯作者:王高辉(1986—),男,副教授,博士。主要从事结构抗爆安全领域的科研工作。E-mail:wanggaohui@whu.edu.cn

es the corresponding preventive measures. In this paper, the typical explosion hazards of urban underground engineering are identified, which expects to help enterprises and the government to take preventive measures and emergency plans to reduce the incidence of explosion accidents in urban underground engineering.

Keywords: urban underground engineering; explosion hazard; classification method; spatial distribution; triggering mechanism

0 引言

二十一世纪,城市地面空间出现紧张,世界各地都在向地下要空间。合理开发利用城市地下工程,是解决城市人口、资源、环境等问题的有效措施,成为全世界城市发展的必然趋向。而在国内外飞速发展的城市地下工程施工和运营过程中,突发爆炸事件频频发生,常常造成灾难性的后果,带来触目惊心的场景。由于城市地下工程具有空间封闭、结构复杂的特点,突发爆炸事件总是容易造成严重的人员伤亡与巨大的经济损失。

自从二十世纪七十年代开始,各国就开始制定重大危险源相关的法律法规和标准^[1]。重大危险源控制技术的开发和研究最早是在英国开始的,我国对重大危险源的辨识及安全评价方面的工作起步相对较晚。虽然目前对于爆炸危险源的研究工作已取得了重要成效^[2],但是在针对城市地下工程爆炸危险源方面,至今还没有深入系统地认识。对爆炸危险源进行分类,最基本的分类方法是依据引起爆炸反应的三相将爆炸危险源分为气相、液相和固相爆炸危险源。除此之外,白勤虎等^[3]依据触发和被触发的关系将危险源分为固有型和触发型危险源;丁新国等^[4]依据危险源存活时间长短、危险物质是否发生变化、有无人员操作管理将危险源分为永久性和临时性的危险源,静态和动态的危险源,有人员操作和无人员操作的危险源。在城市地下工程爆源空间分布方面,钱七虎等^[5]研究了恐怖袭击炸药的可能出现位置,分析了恐怖袭击爆源的空间分布特征;杜艳等^[6]分析了油气管道泄漏爆炸的原因,侧面说明了油气管道爆源的空间分布特征;陈兵等^[7]分析了城市排水系统中悬浮沼气的空间分布;应志刚等^[8]分析了地下生产车间悬浮粉尘的空间分布。在城市地下工程突发爆炸诱发机理及条件方面,国内外学者进行了广泛的研究。庞惠心等^[9]从沼气池的工作原理出发,推论出是明火引爆

了下水道内积聚的爆炸性气体混合物,从而引发了下水道爆炸,并对下水道爆炸危害性进行了分析,得出了相应的结论和预防措施;O. Gutierrez等^[10]通过实验分析,发现提高污水的PH值能抑制沼气的产生,从而避免下水道沼气爆炸;周进科等^[11]分析了液相爆炸物的爆炸诱发机理,发现输油管道爆炸可能是石油化工管网与供水管道交叉腐蚀破裂,加上救援施工产生火花导致;袁厚明^[12]从灾害损失出发,就管道泄漏爆炸的诱因进行了研究,他认为提高管道耐压等级、采取有效防腐措施等方式能防止输油管道发生泄漏爆炸;全策明等^[13]基于实际灾害事故情况,对可燃性粉尘的爆炸诱因进行了研究;张二强等^[14]探讨了粉尘爆炸的特性和预防措施,认为粉尘爆炸可以从可燃物、助燃剂和点火源三个方面进行预防与控制。

随着城市地下工程突发爆炸事件报道的增加,越来越多的学者意识到,辨识城市地下工程爆炸危险源是安全管理爆炸危险源的一项基本工作,是遏制城市地下工程突发爆炸事故发生的有效措施。不少安全学者开始将目光放在城市地下工程中,对城市地下工程爆炸危险源的研究逐渐丰富。本文从城市地下工程典型爆炸危险源的分类、空间分布和爆炸诱因三个方向出发,对城市地下工程典型爆炸危险源进行辨识,具有一定的现实与指导意义。

1 城市地下工程爆炸危险源分类

目前,全世界主要的城市地下工程分为民用、公用、公共、交通、工业、防护六类,包括地铁、地下人行通道、地下公路隧道、地下商城、地下车库、地下工厂车间、地下油气管道等^[15-16],表1为城市地下工程的功能分类情况。从表1可以看出,不同分类的城市地下工程有不同的典型设施和结构,也就可能存在不同类型的爆炸危险源。

现有的爆炸危险源分类方法太笼统,将其应用

表1 城市地下工程的功能分类

Table 1 Functional classification of urban underground engineering

功能分类	典型设施
地下民用建筑	住宅地下室、地下宾馆等
地下公用设施	地下各类管线、地下变电站、地下储库等
地下公共建筑	地下车库、地下商业设施、地下娱乐设施、地下办公设施等
地下交通建筑	地铁、地下人行道、地下公路隧道、地下物流等
地下工业设施	地下生产车间、地下实验室、地下污水处理厂、地下垃圾处理厂等
地下防护设施	地下避难所、地下防灾设施等

于城市地下工程存在无针对性、不深入等问题,无法对政府与企业防爆防控工作起到较好的作用。故对城市地下工程典型爆炸危险源进行研究,并提出针对城市地下工程爆炸危险源的分类方法。

城市地下工程典型爆炸危险源有炸弹、可燃性粉尘、火工品、天然气、沼气、石油等。炸弹主要来自恐怖爆炸袭击,按恐怖爆炸袭击方式可分为普通炸弹、汽车炸弹、人体炸弹三大类;可燃性粉尘、火工品的爆炸一般发生在地下工厂,其爆炸威力通常很大;天然气、沼气的主要成分均为甲烷,石油为各种烷烃、环烷烃及芳香烃的混合物,天然气和石油的爆炸一般发生在地下油气管道中,沼气爆炸一般发生在水道封闭空间内。

以引起爆炸反应的三相、爆源空间分布特征、城市地下工程种类和时段这三种分类依据对城市地下工程爆炸危险源进行分类,见表2。下面对这三种分类方法分别进行描述。

表2 城市地下工程爆炸危险源分类方法

Table 2 Classification method of explosive hazard sources in urban underground engineering

分类依据	分类
引起爆炸反应的三相	气相、液相和固相爆炸危险源
爆源空间分布特征	点爆源、线爆源和面爆源
城市地下工程种类和时段	各类城市地下工程施工期和运营期爆炸危险源

按引起爆炸反应的三相分类,是爆炸危险源最基本的分类方法之一。城市地下工程气相爆炸危险源主要有天然气、沼气、瓦斯等,液相爆炸危险源主要有液化石油气等,固相爆炸危险源主要有化工

表3 按引起爆炸反应的三相划分的分类方法

Table 3 Classification method according to the three phases causing explosion reaction

爆炸类别	常见爆源
气相爆炸	天然气(管道运输、储存)、沼气、瓦斯
液相爆炸	液化石油气(管道运输、储存)
固相爆炸	化工用品、炸药(运输、储存、恐怖袭击)、可燃性粉尘

用品、炸药、可燃性粉尘等,见表3。

一般来讲,物体可以按空间分布情况分为点源、线源、面源和体源。本节将城市地下工程典型爆炸危险源按空间分布特征分为点爆源、线爆源和面爆源三大类,见表4。

表4 按爆源空间分布特征划分的分类方法

Table 4 Classification method based on spatial distribution characteristics of explosive sources

类型	典型爆源
点爆源	恐怖袭击炸弹,火工品,可燃气体、液体储罐等
线爆源	管道中天然气、石油等
面爆源	悬浮的可燃性气体、可燃性粉尘等

按城市地下工程种类和时段划分的分类方法是重点要介绍分类方法。这种分类方法首先对城市地下工程进行划分,主要分为地铁、地下行车隧道、地下商城、地下车库、油气管道、下水道、地下生产车间和地下贮存车间,再将各类城市地下工程划分为两个时段(施工期和运营期),然后列出各类城市地下工程施工期和运营期可能出现的典型爆炸类型。该分类方法的具体分类情况见表5。

从表5可以看出,无论是在城市地下工程的施工期还是运营期,均有不同类型突发爆炸事件的发生。城市地下工程的施工期更可能发生工程不安全施工为诱发原因的爆炸,而运营期更可能出现管理不善、恐怖袭击为诱发原因的爆炸。施工期发生爆炸的城市地下工程主要是地铁、地下行车隧道这类大型城市地下工程,因为相比较小型城市地下工程,它们的施工常常要穿过各种地下管网,存在更多安全问题。而在运营期,各类城市地下工程均有可能发生爆炸,且引起爆炸事故的爆炸危险源类型往往不同。

表5 按城市地下工程种类和时段划分的分类方法

Table 5 Classification method according to types and time periods of urban underground engineering

城市地下工程种类	时段	主要爆炸类型
地铁	施工期	工程施工导致油气管道泄漏爆炸 工程施工导致排水管道沼气爆炸
	运营期	恐怖袭击人体炸弹、固体炸弹爆炸 地铁事故爆炸 人员携带易燃、易爆物品爆炸 地表易燃、易爆物品爆炸 周边油气、排水管道爆炸
地下行车隧道	施工期	工程施工导致油气管道泄漏爆炸 工程施工导致排水管道沼气爆炸
	运营期	恐怖袭击汽车炸弹、固液体炸弹爆炸 汽车事故爆炸 汽车携带易燃、易爆物品爆炸 周边油气、排水管道爆炸
地下商城	运营期	恐怖袭击人体炸弹、固体炸弹、液体炸弹爆炸 易燃、易爆物品管理不善导致爆炸 地表易燃、易爆物品爆炸
地下车库	运营期	汽车油箱泄漏爆炸 恐怖袭击汽车炸弹、人体炸弹、固液体炸弹爆炸 地表易燃、易爆物品爆炸
油气管道	运营期	管道问题、自然因素、人为因素等导致油气泄漏爆炸
下水道	运营期	沼气聚集爆炸
地下生产车间	运营期	可燃性粉尘爆炸
		生产过程不安全因素导致火工品爆炸 地表易燃、易爆物品爆炸
地下贮存车间	运营期	可燃性粉尘爆炸
		贮存过程不安全因素导致火工品爆炸 地表易燃、易爆物品爆炸

2 城市地下工程典型爆源空间分布特征

前文已述,城市地下工程典型爆炸危险源可以按空间分布特征分为点爆源、线爆源和面爆源三大类。各类爆炸危险源(点爆源、线爆源和面爆源)的空间分布特征不同,所带来的影响一般也不同。

城市地下工程恐怖袭击的爆炸危险源一般为固体或液体炸弹,属于城市地下工程中的典型点爆源。

城市地下工程恐怖爆炸袭击主要有以下三种类型:(1)炸弹爆炸。这种爆炸方式一般发生在地铁站、地下隧道等人流量、车流量大的位置;(2)汽车炸弹爆炸。一般发生在地下车库、地下行车隧道等车辆较多的位置;(3)人体炸弹爆炸。这种爆炸方式一般发生在地铁站、地下人行通道、地下商业街等人流量大的位置。人流量、车流量越大的场所,越重要的建筑,越隐蔽的位置,越有可能遭受恐怖爆炸袭击^[5]。

城市地下工程管网复杂,各种管道包括危险液体管道、天然气长输管道和集输管道、配气管网及丙烷、丙烯等危险烃类管道等^[17]。城市地下工程管道中的可燃性油气一般属于线爆源。通过分析地下油气管道爆炸事件,不难发现油气管道爆炸一般发生在管道破损泄漏位置的附近。而通常,导致管道发生破损泄漏的因素有外部干扰、材料缺陷和环境腐蚀三种,故城市地下工程油气管道爆源的空间分布主要在油气管道的外部干扰处、材料缺陷处和环境腐蚀处等。

城市地下工程悬浮的沼气和可燃性粉尘为典型面爆源。如果它们悬浮在空气中,达到了一定的浓度,便容易形成爆炸性混合物,遇到火星就可能引发爆炸。一般来讲,沼气和可燃性粉尘只有浓度达到爆炸下限,才可能发生爆炸。据此分析,爆炸只可能出现在高浓度聚集处。

结合分析,城市地下工程爆源空间分布特征见表6。

表6 城市地下工程典型爆源的空间分布

Table 6 Spatial distribution of typical explosive sources in urban underground engineering

类型	典型爆源	爆源空间分布特征	爆源可能位置
点爆源	恐怖袭击爆源	人流量、车流量大的场所,含重要设施的场所,易隐蔽的位置	重要建筑物地下层、大型公共场所地下层、地铁、地下涵洞、地下隧道、地下车间、地下车库等
线爆源	油气管道爆源	管道破裂位置,即外部干扰处、材料缺陷处、腐蚀处等	施工干扰过的位置、自然灾害干扰过的位置、防腐层破坏处、焊缝缺陷处、与排水暗渠交汇处、水文地质条件恶劣处、管道老化部位等
面爆源	悬浮的沼气 悬浮的可燃性粉尘	容易聚集的狭小空间	污水处理单元的进水格栅、格栅井,污泥处理单元的污泥浓缩池、贮泥池等 ^[7] 生产车间的粉尘收集器、鼓风机、干燥机、通风管道等 ^[8]

3 城市地下工程突发爆炸诱发机理及条件

一般来讲,爆炸的发生需要一定的诱发条件,而基本条件主要有三点:(1)爆炸物:能与氧气反应的物质,包括气体爆炸物、液体爆炸物和固体爆炸物;(2)助燃剂:一般为空气或氧气;(3)点燃源:包括明火源、机械火花、静电火花、高温、光能等。城市地下工程爆炸除了以上三点基本条件外,还有其它诱发因素。不同类型城市地下工程突发爆炸的诱发机理及条件存在着一定的差异。本节研究城市地下工程各类爆炸的发生原因,分析城市地下工程典型爆炸(天然气管道爆炸、沼气爆炸、地下空间粉尘爆炸、地下车库爆炸)的诱发机理及条件,并提出各类爆炸一些有效的预防与控制措施。

天然气管道发生爆炸不仅需要天然气积聚、充足的氧气、一定的火源,还离不开管道的破裂及天然气的泄漏。只有在天然气管道发生破裂的前提下,甲烷才有可泄漏,达到爆炸极限浓度(5%~15%),与氧气混合形成爆炸性气体,遇见明火发生爆炸。诱发管道破裂的因素有很多,主要可以归于管道疲劳、机械冲击作用、腐蚀作用和自然灾害这四种^[18]。预防发生天然气管道泄漏爆炸的措施主要有:(1)从设计、施工到监督上严格检验,严格按照规划设计方案进行管道施工,确保管道施工质量^[19];(2)合理规划管道线路,减少与地下线缆、下水道等其它地下公共设施的交汇;(3)注意防雷防静电防腐监测,及早发现管道老化和破损部位,提前采取修补、更换措施。

对于排水管道沼气爆炸,首先需要沼气的形成。沼气是由微生物发酵及分解作用而产生的一种以甲烷为主要成分的混合可燃性气体,一般含甲烷50%~70%,其余为二氧化碳和少量的氮、氢等。在城市地下工程排水管道中,由于通风条件较差,沼气很有可能形成,一旦遭遇明火常发生爆炸。除了明火源外,诱发排水管道沼气爆炸的条件主要有以下四点:(1)大量的有机物。城市污水存在大量的含有多糖、蛋白质或脂类的有机物,它们为沼气产生提供原料^[7];(2)封闭无氧空间。排水管道的有限空间要比较封闭,通风条件较差,更容易产生并聚集沼气^[20];(3)丰富的微生物种群。排水管道上要含有较丰富的微生物种群。有机质在微生物作

用下才会不断厌氧分解,最后产生沼气;(4)适宜的发酵温度。沼气发酵温度一般在10~60℃,最适宜的发酵温度一般为30~45℃。城市地下排水管网中较容易提供沼气适宜的发酵温度。控制排水管道沼气爆炸的措施主要有:(1)适当增加地下排水管道的坡度,增加污水的流速,从而减少有机物质的沉淀及其在管道内的滞留时间,减少沼气的产生;(2)增加排水管道内含氧量,对地下排水管道进行适当通风,抑制厌氧发酵过程;(3)提高排水管道PH值,抑制厌氧菌活性,从而抑制无氧产生沼气的过程^[21]。

可燃粉尘涉及范围非常广,经常存在于我们的周围。可燃粉尘与可燃气体的爆炸诱发机理及条件有一定的相似之处,但引起粉尘爆炸需要的能量更高,一般来说粉尘的最小点火能量比气体大1~2个数量级^[14]。粉尘爆炸可能会形成连环爆炸,造成更为严重的后果。诱发粉尘爆炸必须具备比可燃气体爆炸更加严格的条件,可分为粉尘自身因素和外部条件因素两大类^[22]。对于粉尘自身因素,主要包括可燃性、浓度和粒径适当、悬浮状态三点;对于外部条件,包括处在相对密闭的空间内、氧气达到一定浓度、点火源及较大的引燃温度、较低的空气湿度等条件。防止地下空间粉尘爆炸的措施主要有以下几点:(1)控制粉尘的扩散,防止粉尘外逸造成粉尘聚集;(2)有针对性地对各类点火源进行预防;(3)提高空气的相对湿度以降低粉尘浓度;(4)采用自然排风与机械排风两种方式通风除尘,使粉尘浓度降低^[13]。

地下车库由于具有空间密闭、空气流通较差、车辆疏散困难的特点,如果发生火灾爆炸,火势容易迅速蔓延,很可能造成灾难性的损失。诱发地下车库汽车爆炸的条件主要有:(1)汽车油箱存在燃油储量,不管是柴油还是汽油,若发生泄漏,可能与空气形成爆炸性混合物,当有人员吸烟或车辆走动产生火花,都可能引发爆炸;(2)地下车库除了汽车外,还存在许多可燃甚至易燃物质,这些物质会使得汽车火灾爆炸更加迅猛^[23]。预防与控制地下车库火灾爆炸的措施主要有:(1)加强通风;(2)设置火灾报警系统和机械排烟系统;(3)增加车辆出入口,增大停车位间距。

结合分析,城市地下工程典型突发爆炸诱发机理及条件见表7。

表7 城市地下工程典型突发爆炸诱发机理及条件

Table 7 Triggering mechanism and conditions of typical sudden explosion in urban underground engineering

突发爆炸类型	爆炸基本条件	主要诱发机理及条件(除爆炸基本条件外)
天然气管道爆炸		管道破裂及天然气泄漏(疲劳、机械冲击、腐蚀、自然灾害等导致)
排水管道沼气爆炸	爆炸物、氧气、点燃源	有机物、微生物种群、无氧封闭空间等条件使沼气形成并聚集
地下空间粉尘爆炸	(明火源、机械火花、静电火花、高温、光能等)	浓度较高(一般超过 20~30 g/m ³)、粒径较小、悬浮、空间密闭、空气湿度较低等
地下车库火灾爆炸		汽车油箱泄漏,汽车可燃物加大火势,人员吸烟或车辆走动产生火花

4 结 论

(1)研究了城市地下工程典型爆炸危险源,介绍了以引起爆炸反应的三相、爆源空间分布特征、城市地下工程种类和时段为分类依据的三种城市地下工程爆炸危险源分类方法。

(2)描述了各类爆炸事件可能发生爆炸的位置(人员密集处、管道泄漏处、高浓度聚集处等),分析了各类爆源(点爆源、线爆源、面爆源)的空间分布特征。

(3)分析了城市地下工程典型突发爆炸(天然气管道爆炸、排水管道沼气爆炸、地下空间粉尘爆炸等)的诱发机理及条件,提出了各类爆炸的预防与控制措施。

参考文献:

[1] Carson P A, Mumford C J. Major hazards in the chemical industry. Part III. A retrospective view [J]. Safety Science, 1993, 16(3/4): 279-305.

[2] 王慧. 重大危险源辨识、分级与评估的研究[D]. 太原: 中北大学, 2014.
Wang H. Research on identification, classification and assessment of major hazard installations [D]. Taiyuan: Zhongbei University, 2014. (in Chinese)

[3] 白勤虎, 白芳, 何金梅. 生产系统的状态与危险源结构 [J]. 中国安全科学学报, 2000, 10(5): 71-75.
Bai Q H, Bai F, He J M. Status and hazard structure of production system [J]. Chinese Journal of Safety Sci-

ence, 2000, 10(5): 71-75. (in Chinese)

[4] 丁新国, 赵云胜. 危险源与危险源分类的研究 [J]. 安全与环境工程, 2005(3): 87-90.
Ding X G, Zhao Y S. Research on hazard sources and hazard source classification [J]. Safety and Environmental Engineering, 2005(3): 87-90. (in Chinese)

[5] 钱七虎, 徐更光, 周丰峻. 反爆炸恐怖安全对策 [M]. 北京: 科学出版社, 2005: 169-178.
Qian Q H, Xu G G, Zhou F J. Security countermeasures against explosion terrorism [M]. Beijing: Science Press, 2005: 169-178. (in Chinese)

[6] 杜艳, 谢英, 王子豪, 等. 天然气管道事故分析 [J]. 管道技术与设备, 2009(2): 16-18.
Du Y, Xie Y, Wang Z H, et al. Natural gas pipeline accident analysis [J]. Pipeline Technology and Equipment, 2009(2): 16-18. (in Chinese)

[7] 陈兵, 王海龙, 张金锋, 等. 城市排水有限空间爆炸性气体产生机理与防治对策 [J]. 中国安全生产科学技术, 2011, 7(5): 67-71.
Chen B, Wang H L, Zhang J F, et al. Generation mechanism and prevention countermeasures of explosive gas in limited space of urban drainage [J]. China Science and Technology of Work Safety, 2011, 7(5): 67-71. (in Chinese)

[8] 应志刚, 蔡文行. 粉尘爆炸的特点与防控 [J]. 消防科学与技术, 2013, 32(3): 247-251.
Ying Z G, Cai W X. Characteristics and prevention of dust explosion [J]. Fire Science and Technology, 2013, 32(3): 247-251. (in Chinese)

[9] 庞惠心. 下水道附近燃放爆竹引起爆炸的原因分析 [J]. 消防安全与防雷减灾, 2016, 21: 167-167.
Pang H X. Analysis of explosion caused by setting off firecrackers near sewers [J]. Fire Safety and Lightning Protection and Disaster Reduction, 2016, 21: 167-167. (in Chinese)

[10] Gutierrez O, Park D, Sharma K R, et al. Effects of long-term pH elevation on the sulfate-reducing and methanogenic activities of anaerobic sewer biofilms [J]. Water Research, 2009, 43(9): 2549-2557.

[11] 周进科, 丁宁, 刘翠萍, 等. 三起石油化工地下低位浅埋爆炸事故的比较 [J]. 中华灾害救援医学, 2016(10): 542-546.
Zhou J K, Ding N, Liu C P, et al. Comparison of three low level shallow buried explosion accidents in petrochemical industry [J]. Chinese Journal of Disaster Rescue Medicine, 2016(10): 542-546. (in Chinese)

[12] 袁厚明. 控制地下管道泄漏爆炸事故的技术措施 [J]. 办公自动化, 2014(增1): 85-90.

- Yuan H M. Technical measures to control underground pipeline leakage and explosion [J]. Office Automation, 2014 (Sup1): 85-90. (in Chinese)
- [13] 仝策明, 杨龙. 粉尘爆炸类事故的预防对策研究[J]. 科技创新导报, 2016(17):14-15.
Tong Q M, Yang L. Study on prevention countermeasures of dust explosion accidents [J]. Science and Technology Innovation Guide, 2016 (17): 14-15. (in Chinese)
- [14] 张二强, 张礼敬, 陶刚. 粉尘爆炸特征和预防措施探讨[J]. 中国安全生产科学技术, 2012(2):88-92.
Zhang E Q, Zhang L J, Tao G. Discussion on characteristics and preventive measures of dust explosion [J]. China Science and Technology of Work Safety, 2012 (2): 88-92. (in Chinese)
- [15] 丁思超, 曹梦珂. 浅析城市地下空间工程导论[J]. 商情, 2019 (12):100.
Ding S C, Cao M K. Introduction to urban underground space engineering [J]. Business Information, 2019 (12): 100. (in Chinese)
- [16] 陶龙光. 城市地下工程[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
Tao L G. Urban underground engineering [M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese)
- [17] 陈天辉, 宋艳芳, 杨勇. 天然气长输管道的管道安全对策及建议[J]. 工程技术: 文摘版, 2016(1):172.
Chen T H, Song Y F, Yang Y. Pipeline safety countermeasures and suggestions for long distance natural gas pipeline [J]. Engineering Technology: Abstract Edition, 2016(1): 172. (in Chinese)
- [18] 杜春莉. 天然气管道泄漏、爆炸原因分析[J]. 中国化工贸易, 2017 (9): 7.
Du C L. Cause analysis of natural gas pipeline leakage and explosion [J]. China Chemical Trade, 2017(9): 7. (in Chinese)
- [19] 魏崑, 王观军. 天然气管线爆炸事故的技术分析[J]. 石油化工安全环保技术, 2001(1):11-13.
Wei W, Wang G J. Technical analysis of natural gas pipeline explosion [J]. Safety and Environmental Protection Technology of Petrochemical Industry, 2001 (1): 11-13. (in Chinese)
- [20] 米莉, 彭乾皓, 彭绪亚. 城市下水道气体爆炸风险评估研究[J]. 中国给水排水, 2013, 29(1):105-108.
Mi L, Peng Q H, Peng X Y. Study on risk assessment of gas explosion in urban sewers [J]. China Water Supply and Drainage, 2013, 29 (1): 105-108. (in Chinese)
- [21] 张远, 吕淑然, 杨凯, 等. 城市污水管道甲烷爆炸防控对策研究现状及展望[J]. 安全与环境工程, 2015, 22 (5):134-138.
Zhang Y, Lyu S R, Yang K, et al. Research status and prospect of prevention and control countermeasures for methane explosion in urban sewage pipeline [J]. Safety and Environmental Engineering, 2015, 22 (5): 134-138. (in Chinese)
- [22] 杨豪, 王培植, 万祥云. 我国气体与粉尘爆炸事故现状及影响因素分析[J]. 安全与环境工程, 2008(1):97-99.
Yang H, Wang P Z, Wan X Y. Analysis on current situation and influencing factors of gas and dust explosion accidents in China [J]. Safety and Environmental Engineering, 2008 (1): 97-99. (in Chinese)
- [23] 杨梁伟. 地下车库火灾的预防与扑救[J]. 科技与生活, 2013(1):186-187.
Yang L W. Prevention and fighting of underground garage fire [J]. Science and Technology and Life, 2013 (1): 186-187. (in Chinese)

(本文编辑: 赵霞)