

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.15.017

综合管廊常见自动灭火系统的效能实验及分析

许云骅¹, 邹丽², 丛北华³, 徐率先¹, 张杨¹, 王家华¹,
朱浩川¹

(1. 上海市城市建设设计研究总院<集团>有限公司, 上海 200125; 2. 上海同泰火安科技有限公司, 上海 201703; 3. 同济大学 上海防灾救灾研究所, 上海 200092)

摘要: 综合管廊是城市生命线工程,对城市运维具有重要作用。根据现有规范要求,需要在含电缆的舱室内布置灭火系统。通过设计不同火源和实验工况,从性能、失能和安全性角度评价综合管廊常用的自动灭火系统(干粉灭火系统和高压细水雾灭火系统)。结果发现,两类灭火系统均能快速灭火,而高压细水雾灭火系统具有降温效果好、现场不留痕迹、全生命周期内成本低等优势,更适用于综合管廊。此外,由于电缆短路火灾时温度较低,为了提高火灾识别的敏感度,可以采用在管廊内设置感烟探测器、在电力电缆上敷设差定温线形感温电缆,以及降低干粉灭火装置动作温度等措施。

关键词: 综合管廊; 干粉灭火系统; 高压细水雾灭火系统; 内部过载火源; 外部燃气火源

中图分类号: TU99 文献标识码: A 文章编号: 1000-4602(2024)15-0115-08

Efficiency Testing and Analysis of Common Automatic Fire Extinguishing System in Utility Tunnel

XU Yun-hua¹, ZOU Li², CONG Bei-hua³, XU Shuai-xian¹, ZHANG Yang¹,
WANG Jia-hua¹, ZHU Hao-chuan¹

(1. Shanghai Urban Construction Design & Research Institute <Group> Co. Ltd., Shanghai 200125, China; 2. Shanghai Tongtai Fire & Security Technology Co. Ltd., Shanghai 201703, China; 3. Shanghai Institute of Disaster Prevention and Relief, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: The utility tunnel serves as a crucial urban infrastructure project, playing a pivotal role in the operation and maintenance of the city. In accordance with the current regulations, it is imperative to install a fire extinguishing system in the cable-containing cabin. The performance, failure capacity and safety of the commonly employed automatic fire extinguishing systems (dry powder fire extinguishing system and high-pressure water mist fire extinguishing system) in utility tunnels were assessed under various experimental conditions involving different fire sources and operational scenarios. Both fire extinguishing systems were capable of rapidly extinguishing fires, but the high-pressure water mist fire extinguishing system offered the advantages of superior cooling effect, leaving no residue at the site, and lower overall life cycle costs, making it more suitable for utility tunnel. In addition, to enhance fire detection sensitivity in the event of a cable short-circuit fire at low temperatures, smoke detectors could be installed in the utility tunnel, and linear temperature sensing cables could be laid on the power cable.

Additionally, measures such as reducing the operating temperature of the dry powder fire extinguishing device should be implemented.

Key words: utility tunnel; dry powder fire extinguishing system; high-pressure water mist fire extinguishing system; internal overload fire source; external gas fire source

综合管廊内部容纳多种市政管线,承担了维系城市正常运行的职责。纳入综合管廊内的管线包括电力电缆、通信电缆、给水管道、排水管道等,其中电力电缆可单独设舱布置,也可与其他管线共舱布置。但是电力电缆存在火灾风险,例如短路、人为纵火等,一旦发生火灾,会影响同舱管线乃至管廊本体,造成严重后果。

根据相关规范要求,综合管廊内含电力电缆的舱室需要采用灭火系统,目前常用气溶胶、高压细水雾和超细干粉为灭火介质的自动灭火系统。国内已建成综合管廊的工程经验^[1-2]证明,采用超细干粉灭火系统和细水雾灭火系统可以有效扑灭电力电缆引起的火灾。关于这两种灭火系统,有学者通过实体火灾全尺寸实验^[3-5]和数值模拟^[6-8]的方法来分折综合管廊内电缆舱的火灾特性和各类灭火系统的灭火效果。有学者通过改变细水雾灭火系统的设计参数(喷头布置方式^[9]、喷头安装角度^[10]、细水雾粒径^[11]、廊内风速^[12]等)来优化设计,也有学者测算出各类综合管廊自动灭火系统的全生命周期成本^[13]。

但是上述研究仍然没有能回答以下问题:①过载短路和人为纵火这两种场景下火灾特性有无不同?②根据运维经验,高压细水雾喷头容易堵塞,而目前综合管廊内细水雾灭火系统往往采用局部淹没的方式,在喷头失能的情况下是否会影响灭火效能的可靠性?③储压式超细干粉自动灭火装置有两种形式,储压式(自有带压氮气喷出干粉)和非储压式(点燃受控火药产生气体来喷出干粉),这两者启动时都会产生大量噪声,是否会影响操作人员的认知、干扰逃生等?

笔者采用全尺寸实验的方式,分析综合管廊两种主流的自动灭火系统(高压细水雾灭火系统和超细干粉灭火系统)在不同火灾场景(电气内部短路火灾、天然气引燃火灾)下的灭火效果和动作时产生的噪声对人体的影响,同时研究上述两种系统在部分失能情况下的灭火可靠性,旨在为综合管廊灭

火系统的设计和运维提供参考。

1 实验设计

1.1 技术路线

效能分析实验主要从灭火性能、失能和喷放安全性三个方面展开,技术路线如图1所示。



图1 效能分析实验技术路线

Fig.1 Technical route of efficiency analysis test

1.2 场地布置

全尺寸实验场地位于上海青浦,标准横断面尺寸为 $B \times H = 3.4 \text{ m} \times 2.9 \text{ m}$,总长100 m。考虑到大部分管廊使用高压细水雾局部应用系统,故选取约30 m的管廊作为研究对象。管廊两侧布置电缆(使用10 kV阻燃C类铝芯交联聚乙烯绝缘聚氯乙烯护套电力电缆)。两种自动灭火系统实验的布置见表1,综合管廊标准断面及缆线安装位置见图2。

表1 灭火系统实验方案

Tab.1 Scheme of fire extinguishing system test

系统类型	布置点位	保护区长度/m	数量及间距	设计参数
非储压式干粉灭火系统	安装在管廊顶部,水平距离电缆桥架边缘0.4 m	28	共设置10个垂直喷射式灭火装置,间隔2.8 m	单个灭火装置充装干粉4 kg,保护体积为 27.61 m^3
储压式干粉灭火系统	安装在管廊顶部,水平距离电缆桥架边缘0.4 m	30	共设置10个垂直喷射式灭火装置,间隔3 m	单个灭火装置充装干粉5 kg,保护体积为 29.58 m^3
高压细水雾灭火系统	细水雾喷头单列布置在管廊顶部,偏离电缆桥架边缘水平距离0.95 m,喷头偏角 30° 朝向被保护电缆桥架,喷放角度为 96°	30	喷头布置间距3 m,共计10个喷头	工作压力 $P = 10 \text{ MPa}$ 流量系数 $K = 0.7$ 喷头流量 $q = 0.7 \text{ L}/(\text{min} \cdot \text{m}^2)$

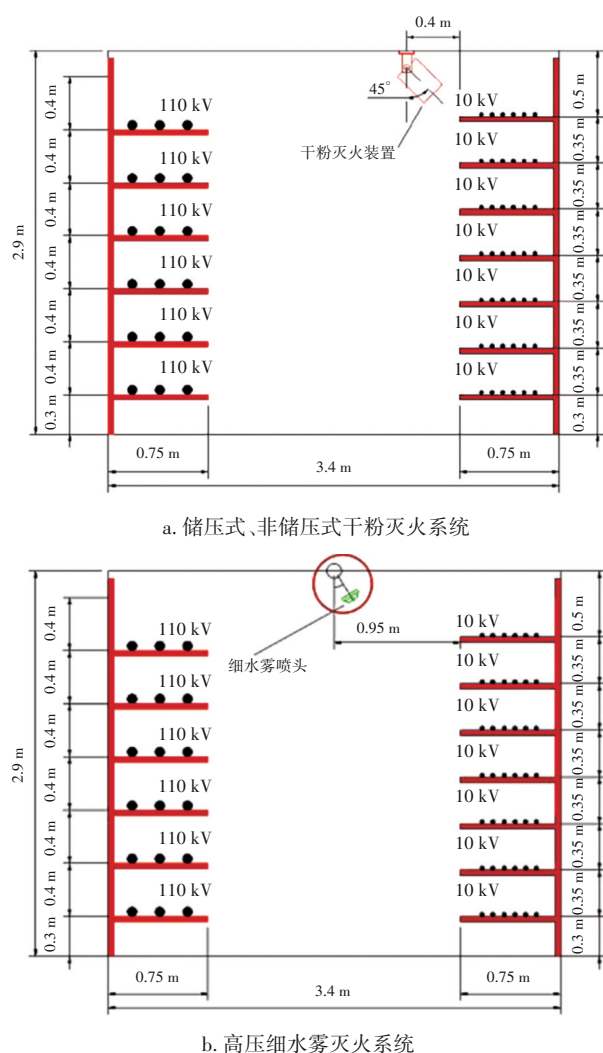


图2 灭火系统安装位置截面示意

Fig.2 Section of installation location of fire extinguishing system

1.3 火源设计

灭火实验火源分两种:内部过载火灾和外部燃烧起火。内部过载的布置方式为使用 6 m^2 C级阻燃电缆皮作为引燃物,长度为 1 m ,内部布置电热丝,电源功率为 2 kW ,采用单层单点3根布置,即单层电缆桥架上布置6根电缆,每2根电缆之间放置一根作为引燃物的电缆,实验中使其通电加热起火;起火位置在最不利点,即火源位于最底层桥架上,且在两个干粉灭火装置或细水雾喷头之间,失能实验起火位置设置在失效的灭火装置或细水雾喷头的正下方。外部燃烧的布置方式采用开口正方形、边长为 0.3 m 的火源盘,盘底部软管连接天然气气瓶,实验中拧开气瓶阀门,在装置出气口用点火棒点燃,预燃 40 s 后关闭阀门,每组实验前使用金属

浮子流量计监控出气量,以保证各工况相同;起火位置确定在最底层桥架下侧,位于两个干粉灭火装置/细水雾喷头之间。热电偶T1~T7分别布置于火源正上方 0.35 、 0.7 、 1.05 、 1.4 、 1.75 、 2.1 和 2.45 m 处。

1.4 实验工况

灭火性能实验:实验工况为1~6,其中工况1和4、2和5、3和6分别对应非储压式干粉灭火系统、储压式干粉灭火系统、高压细水雾灭火系统;工况1~3的起火方式为内部过载,工况4~6的起火方式为外部点火;工况1、2、4、5的火源在灭火装置之间,工况3、6的火源在两个喷头之间。

失能实验:实验工况为7~9,分别对应非储压式干粉灭火系统、储压式干粉灭火系统、高压细水雾灭火系统;起火方式均为外部燃烧;工况7、8中火源正上方的干粉灭火装置失效,其余的9个干粉灭火装置正常工作,工况9中火源正上方的细水雾喷头失效,其余的9个细水雾喷头正常喷放。

喷放安全性实验:实验工况为10~12,分别对应非储压式干粉灭火系统、储压式干粉灭火系统、高压细水雾灭火系统;工况10、11中10个干粉灭火装置同时喷放,工况12中10个喷头同时启动。

2 结果与讨论

2.1 自动灭火系统灭火性能测试

① 内部过载

工况1、2、3为诱发内部过载后,缆线发生阴燃现象,产生大量烟气并出现明火,然后采用备选的灭火系统进行灭火性能测试。图3为超细干粉灭火系统内部短路着火状态下的灭火过程。由于3种工况下均未达到 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的自动启动温度(分别为 57.2 、 64.8 及 $51.3\text{ }^{\circ}\text{C}$),故通过人工方式启动测试系统。



a. 通电10 s后电缆阴燃产生烟气

b. 阴燃产生烟气后375 s明火出现



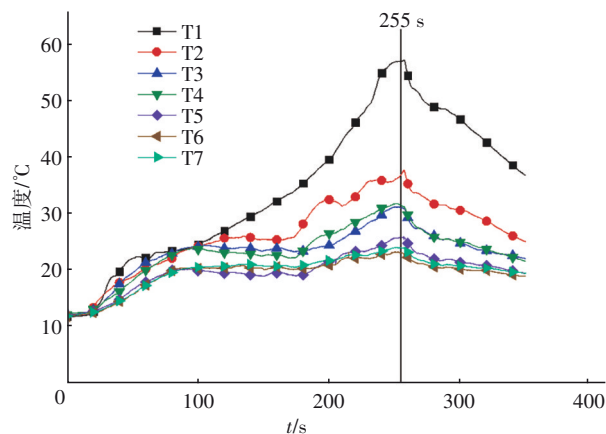
c. 明火燃烧 90 s 后温度不再增加

d. 储压式干粉喷放 2 s 内扑灭明火

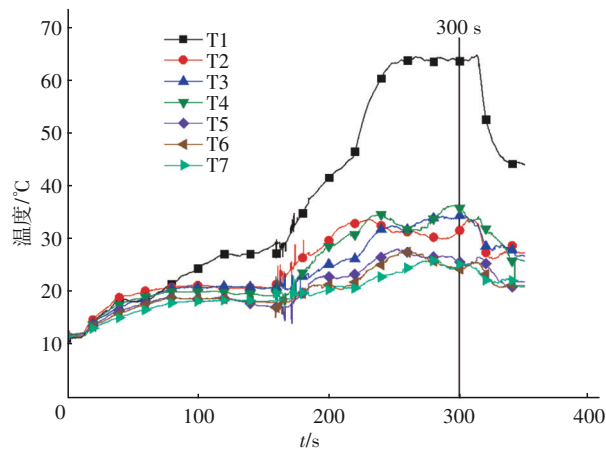
图3 超细干粉灭火系统内部短路着火状态下的灭火过程

Fig.3 Fire extinguishing process under the condition of internal short-circuit using super fine dry powder fire extinguishing system

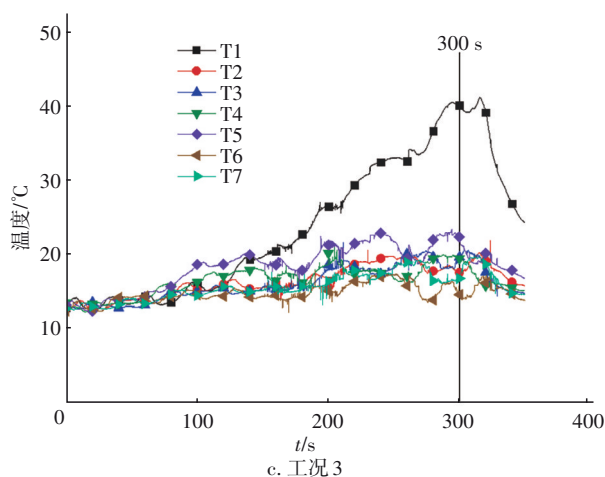
工况 1~3 的火场温度变化如图 4 所示。可以看出, 工况 1~3 在 250~300 s 左右分别达到最高温度, 人工启动灭火系统以后, 两种超细干粉灭火系统在 2 s 内扑灭明火, 高压细水雾灭火系统在 3 s 内扑灭明火。



a. 工况 1



b. 工况 2



c. 工况 3

图4 工况 1~3 火灾温度曲线

Fig.4 Fire temperature curves in condition 1~3

此时管廊内仍然存在高温烟气, 仍需要等待廊体内温度达到合适的温度后 (25 °C) 才能开展后续工作, 因此继续观察温度的变化情况。两种超细干粉灭火系统历经 184.8 和 186 s 后缓慢下降到 25 °C。而高压细水雾灭火系统历经 30.3 s 就恢复到 25 °C, 仅为其他两种灭火系统的 1/6。这是因为高压细水雾的灭火机理为冷却、窒息、阻隔热辐射和乳化作用等, 高压细水雾的雾滴可以吸收大量热量, 阻隔燃烧物体的热辐射, 同时在燃烧物周围形成屏障以阻隔氧气, 使之能快速灭火并降温。

② 外部点火

工况 4~6 均采用外部火源引燃电力电缆, 待燃烧 40 s 后启动备选的灭火系统进行灭火性能测试。图 5 展示了高压细水雾灭火系统的灭火过程。3 种工况下, 管廊内出现明火, 火场温度迅速上升, 火源上方最高温度分别达到 757.7、753.7 及 781.8 °C。启动灭火装置后, 3 种灭火装置均在 5 s 内扑灭明火。但是高压细水雾灭火系统在启动灭火后的 30 s 内降温效率慢于干粉灭火系统, 此时火场温度在 260 °C 左右, 随后降温效率优于干粉灭火系统。



a. 外部点火

b. 燃烧 40 s 高压细水雾系统启动前

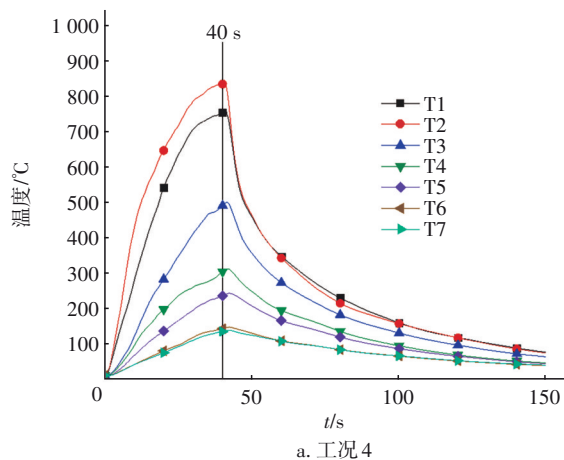


c. 高压细水雾系统启动后灭火

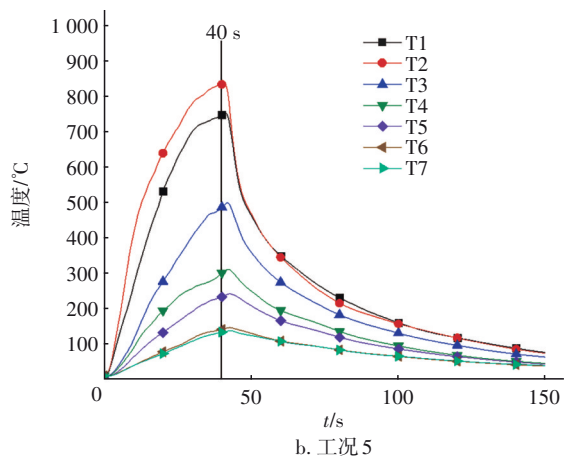
图5 高压细水雾灭火系统外部过载灭火实验过程

Fig.5 Fire extinguishing test process under the condition of external overload of high-pressure water mist fire extinguishing system

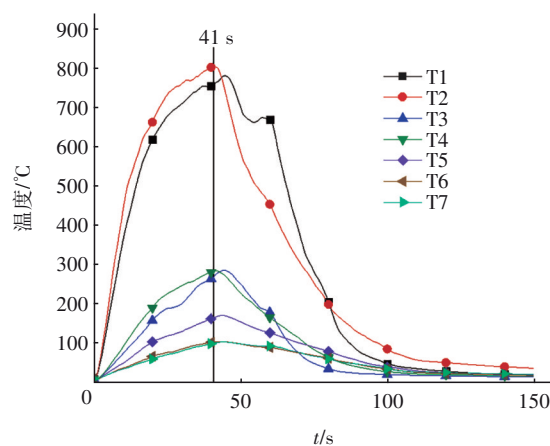
考虑到 50°C 为人体不耐受温度,因此分析了3种灭火系统达到 50°C 所需要的时间,见图6。可知,储压式及非储压式干粉灭火系统相比于高压细水雾灭火系统的降温时间更长,高压细水雾灭火系统的降温效果比较持续,且可节约 $2/3$ 的降温时间。采用储压式及非储压式干粉灭火系统的火场温度下降缓慢,不利于人体安全及火场的恢复。而采用高压细水雾系统灭火,108 s后火场温度降到 20°C 。



a. 工况4



b. 工况5



c. 工况6

图6 实验工况4~6火灾温度曲线

Fig.6 Fire temperature curves in condition 4~6

从工况1~6的实验中可以发现,启动干粉灭火系统后现场情况较差,喷放的粉末很难清理,不利于后期的恢复,如图7所示。



a. 喷放前

b. 喷放后

图7 储压式及非储压式超细干粉灭火系统喷放前与喷放后照片

Fig.7 Photos of super fine dry powder fire extinguishing system before and after spraying

2.2 固定灭火系统失能情况下灭火性能实验

综合管廊内环境复杂,可能会存在粉尘飘扬等问题,从而导致高压细水雾的喷头堵塞。此外,综合管廊内往往采用局部淹没系统,那么喷头启动和喷放的可靠性值得研究。为考察单个干粉装置/高压细水雾喷头在失能情况下对灭火性能的影响,采取与外部点火相似的实验设计,待燃烧40 s后开启灭火装置。当火源正上方灭火装置失效时,采用其余9个非储压式干粉灭火装置灭火的过程如图8所示。

工况7~9采用外部火源引燃电力电缆,待燃烧40 s后启动备选的灭火系统进行灭火性能测试,但是实验前令火源正上方的1个喷放设施失效,其余设备正常喷放。工况7~9的火灾温度曲线如图9所示。

示。可以发现,3个系统均在5 s内扑灭明火,表明3种灭火系统均具有较好的可靠性。

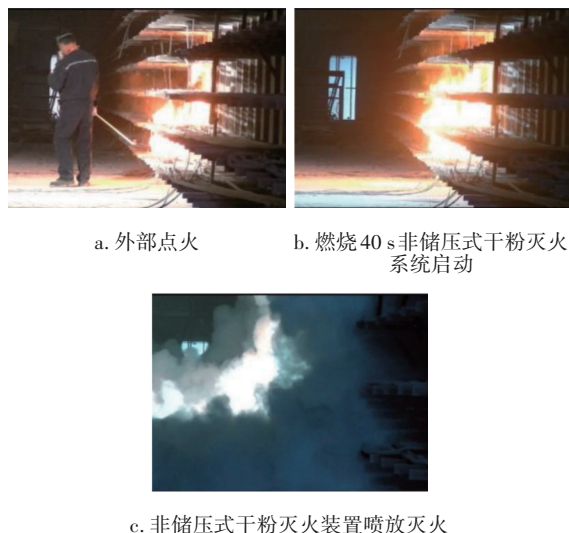


图8 非储压式干粉灭火系统火灾实验过程

Fig.8 Fire extinguishing process using super fine dry powder fire extinguishing system

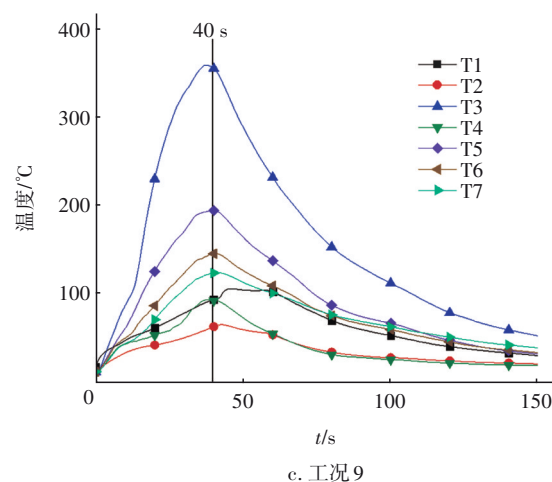
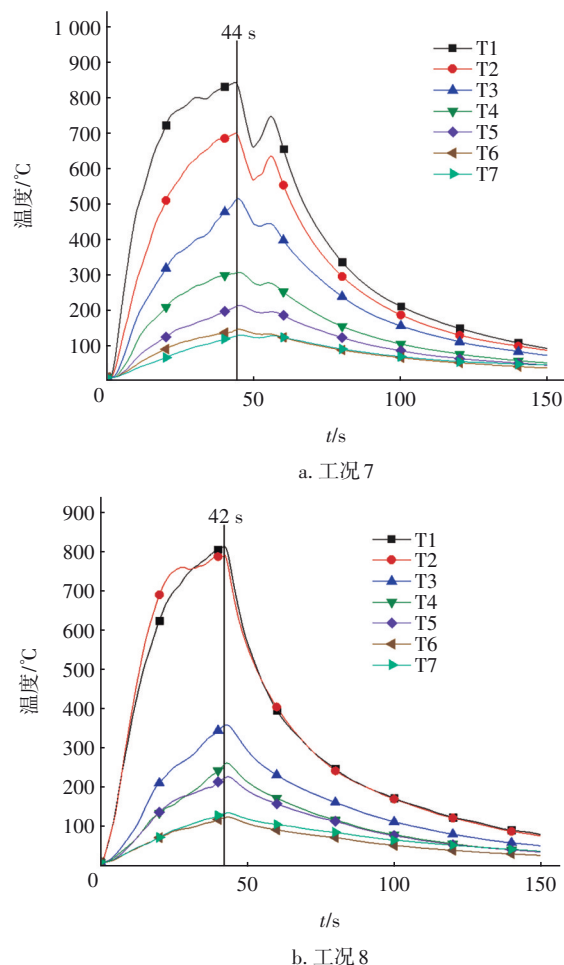


图9 工况7~9火灾温度曲线

Fig.9 Fire temperature curves in condition 7-9

非储压式干粉灭火系统喷放后经过151 s火场温度由最高时的843 °C降低到52.7 °C,再经过155.1 s降低到50 °C。储压式干粉灭火系统经过140 s后火场温度由最高时的813.4 °C下降到52.7 °C。高压细水雾系统喷放后,经过112 s火场温度由最高时的360 °C降低到52.7 °C。此外,在失能情况下,高压细水雾灭火系统降温效率更高,可节约20%~30%的时间,有利于灾后恢复。

2.3 喷放安全性测试

灭火系统除需要控制管廊内火灾风险外,其自身的安全性也需要满足要求。对储压式和非储压式干粉灭火系统以及高压细水雾灭火系统喷放时的安全性进行测试,主要采集系统喷放灭火药剂时产生的噪声,评估是否对人员产生不利影响甚至危险。

对实验管廊内30 m长的区域使用隔墙封闭两端作为测试段,在不起火工况下测量各系统喷放灭火剂时的音量。

干粉灭火系统:当测试储压式和非储压式干粉灭火系统时,在不点火工况下,10个干粉灭火装置同时启动,测量喷放瞬间的音量。

高压细水雾灭火系统:测试高压细水雾灭火系统时,在不点火工况下10个喷头进行局部淹没式保护,测量喷放瞬间的音量。

经测定,储压式和非储压式干粉灭火系统喷放后的噪声值分别为101和105 dB,均超过80 dB,已属于污染范畴。而高压细水雾灭火系统的噪声值为76 dB,不会产生声污染。

2.4 灭火系统建设运维成本

根据文献[13]的计算方式,可以得到高压细水雾灭火系统和超细干粉灭火系统全生命周期的建设及运维成本,见表2。

表2 1 km管廊不同灭火系统的成本

Tab.2 Cost of different fire extinguishing systems per kilometer of utility tunnel 万元

项 目	直接投资			间接投资				投资总计
	设备费	材料及安装费	小计	维护及检测费	灭火剂充装费	设备更换费	小计	
高压细水雾灭火系统	150	130	280	20	0	23	43	328
超细干粉灭火系统		125	125	218	439		657	782

注: ①超细干粉灭火系统的粉剂每5年更换1次,根据综合管廊100年寿命计算,需更换20次,每个超细干粉装置检测费为400元/(年·个)。高压细水雾灭火系统采用不锈钢材质,寿命可达50年,因此需更换1次,高压细水雾灭火系统检测费按1万元/(km·a)计算。②贴现率按照基准利率4.85%计算且不考虑未来各系统的价格变动。

由表2可以看出,建设阶段高压细水雾灭火系统的投资要高于超细干粉灭火系统。运维阶段超细干粉需要定期替换,更替成本大,而高压细水雾灭火系统只需要定期完成检测和更换喷头,因此运维成本比超细干粉灭火系统低。从整个生命周期来看,高压细水雾灭火系统的性价比较超细干粉灭火系统更高。

3 结论

① 内部过载火灾下,储压式和非储压式干粉灭火系统均在2 s内灭火,高压细水雾系统在3 s内灭火。外部点火工况下,不论系统正常工作还是部分正常工作,3种灭火系统均在5 s内扑灭明火。可见,3种灭火系统的灭火效果均比较理想。但是3种火灾工况下,高压细水雾灭火系统的降温效果更好,温度下降更快,更有利于火灾后的现场恢复。内部过载火灾下,采用高压细水雾灭火降低到25℃的时间比其他两种灭火系统少5/6;在外部点火工况下,若将火源点上方温度降低到50℃,则高压细水雾灭火系统可节约2/3的时间。

② 失能实验中,若将火源点上方温度降低到

52.7℃,高压细水雾灭火系统相比其他两种系统可以节约20%~30%的时间。以上均表明随着降温目标值的降低,高压细水雾灭火系统的降温效果更明显。

③ 超细干粉灭火系统存在喷放后现场不易清理、喷放时噪声过大、全生命周期内建设和运维成本高的问题,建议管廊内采用高压细水雾系统进行灭火。

④ 由于电缆短路火灾时温度较低,为了提高火灾识别的敏感度,可以采用在管廊内设置感烟探测器、在电力电缆上敷设差定温线形感温电缆,以及降低干粉灭火装置动作温度等措施。

参考文献:

- [1] 席林,郭俊,李琰. 综合管廊自动灭火系统选择[J]. 给水排水,2018,44(S2):200-204.
XI Lin, GUO Jun, LI Yan. Selection of automatic fire extinguishing system in utility tunnel [J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44 (S2): 200-204 (in Chinese).
- [2] 朱安邦,刘应明,汪叶萍. 深圳前海合作区综合管廊自动灭火系统比选[J]. 中国给水排水,2018,34(18):42-47.
ZHU Anbang, LIU Yingming, WANG Yeping. Comparison of automatic fire extinguishing systems in utility tunnel in Shenzhen Qianhai Cooperation Area [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34 (18): 42-47 (in Chinese).
- [3] 席林,张宏民,龙忠业. 高压细水雾在综合管廊电缆舱的灭火试验研究[J]. 中国给水排水,2019,35(1):63-67.
XI Lin, ZHANG Hongmin, LONG Zhongye. Fire extinguishing test of high pressure water mist in power cable cabin of utility tunnel [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35 (1): 63-67 (in Chinese).
- [4] 陈治君,张刚,石晓龙,等. 城市地下综合管廊灭火系统试验[J]. 消防科学与技术,2019,38(1):110-112,118.
CHEN Zhijun, ZHANG Gang, SHI Xiaolong, et al. An experimental study of fire extinguishing system for urban utility tunnel [J]. Fire Science and Technology, 2019, 38 (1): 110-112, 118 (in Chinese).
- [5] 田思楠,李炎锋,徐晨亮,等. 综合管廊电缆舱灭火系统效果研究[J]. 消防科学与技术,2021,40(6):

- 880-883.
- TIAN Sinan, LI Yanfeng, XU Chenliang, *et al.* Study on the effect of fire extinguishing system in cable compartment of utility tunnel [J]. *Fire Science and Technology*, 2021, 40(6):880-883(in Chinese).
- [6] 吴丹,王永强,罗晶宇,等. 细水雾应用于综合管廊电缆仓火灾灭火的数值模拟[J]. *西南科技大学学报*, 2021, 36(2):49-54.
- WU Dan, WANG Yongqiang, LUO Jingyu, *et al.* Numerical simulation study on the effect of water mist on the fire extinguishment of the comprehensive pipeline gallery [J]. *Journal of Southwest University of Science and Technology*, 2021, 36(2):49-54(in Chinese).
- [7] 孙瑞雪,姚斌. 细水雾在城市地下综合管廊内灭火特性的数值模拟研究[J]. *火灾科学*, 2019, 28(1):28-34.
- SUN Ruixue, YAO Bin. Numerical stimulation on extinguish effect of water mist system in urban underground utility tunnel [J]. *Fire Safety Science*, 2019, 28(1):28-34(in Chinese).
- [8] 黄萍,邓茜,余龙星. 综合管廊电缆火灾细水雾灭火效果数值模拟[J]. *安全与环境工程*, 2021, 28(5):80-87.
- HUANG Ping, DENG Xi, YU Longxing. Numerical simulation of the performance of fire extinguishing by water mist in utility tunnel cable fire [J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2021, 28(5):80-87(in Chinese).
- [9] 张杰,舒宁,何俊璋,等. 喷头布置方式对综合管廊细水雾灭火的影响[J]. *消防科学与技术*, 2019, 38(2):236-239.
- ZHANG Jie, SHU Ning, HE Junzhang, *et al.* Influence of sprinkler arrangement on water mist fire extinguishing in utility tunnel [J]. *Fire Science and Technology*, 2019, 38(2):236-239(in Chinese).
- [10] 陈雅惠,李太富,杨猛,等. 喷头安装角度对综合管廊细水雾灭火的影响[J]. *消防科学与技术*, 2020, 39(1):70-73.
- CHEN Yahui, LI Taifu, YANG Meng, *et al.* Influence of sprinkler installation angle on water mist extinguishing fire in utility tunnel [J]. *Fire Science and Technology*, 2020, 39(1):70-73(in Chinese).
- [11] 石磊,杨永斌. 细水雾粒径对地下综合管廊电力舱火灾灭火效果的影响[J]. *消防技术与产品信息*, 2018, 31(11):47-50.
- SHI Lei, YANG Yongbin. Influence of fine water mist size on extinguishing effect of power cabin fire in underground utility tunnel [J]. *Fire Technique and Products Information*, 2018, 31(11):47-50(in Chinese).
- [12] 王致远,李炎锋,王红艺,等. 管廊风速对细水雾系统灭火效果影响研究[J]. *消防科学与技术*, 2020, 39(2):228-232.
- WANG Zhiyuan, LI Yanfeng, WANG Hongyi, *et al.* Influence of wind speed on fire suppression of water mist in pipe gallery [J]. *Fire Science and Technology*, 2020, 39(2):228-232(in Chinese).
- [13] 许云骅,邹丽,倪杨,等. 综合管廊自动灭火系统选型分析及全生命周期成本核算[J]. *中国市政工程*, 2020(5):62-65, 117.
- XU Yunhua, ZOU Li, NI Yang, *et al.* Selection analysis of automatic fire extinguishing system for utility tunnel & full life cycle cost accounting [J]. *China Municipal Engineering*, 2020(5):62-65, 117(in Chinese).

作者简介:许云骅(1990-),男,江苏昆山人,大学本科,工程师,主要研究方向为市政给排水、综合管廊和智慧水务的规划与设计。

E-mail:tomxuyunhua@163.com

收稿日期:2023-04-10

修回日期:2023-07-17

(编辑:任莹莹)