

# 电缆隧道火灾事故特点与灭火系统研究综述

曾晓亮<sup>1</sup>,李富祥<sup>1</sup>,李明伟<sup>2</sup>,谭文强<sup>2</sup>,宋宇<sup>3</sup>,王方强<sup>1</sup>

(1.国网四川省电力公司电力科学研究院,四川成都 610041;2.国网四川省电力公司,四川成都 610041;

3.国网四川省电力公司绵阳供电公司,四川绵阳 621000)

**摘要:**基于近年来国内外电缆隧道火灾事故统计数据,文中总结了电缆隧道火灾事故发生的原因和特点,详细介绍、分析了目前应对电缆隧道火灾的各种消防灭火系统,如水喷雾灭火系统、高压细水雾灭火系统、气体灭火系统、气溶胶灭火系统、超细干粉灭火系统等。针对不同电缆隧道消防灭火系统的选择提出了推荐建议,认为对于保护长距离、大容积的电缆隧道,应优先考虑高压细水雾灭火系统,其次为超细干粉灭火系统;对于电缆接头或其他局部灭火重点防护区域可考虑超细干粉灭火系统等;不建议在长距离、大容积的电缆隧道内使用气体灭火系统、水喷雾灭火系统和气溶胶灭火系统。

**关键词:**电缆隧道;综合管廊;火灾事故;灭火系统

中图分类号:U 45 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2022)04-0055-05

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220411

## Research Review on Characteristics of Cable Tunnel Fire Accident and Fire Extinguishing System

ZENG Xiaoliang<sup>1</sup>, LI Fuxiang<sup>1</sup>, LI Mingwei<sup>2</sup>, TAN Wenqiang<sup>2</sup>, SONG Yu<sup>3</sup>, WANG Fangqiang<sup>1</sup>

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China;

3. State Grid Mianyang Electric Power Supply Company, Mianyang 621000, Sichuan, China)

**Abstract:**Based on the statistical data of cable tunnel fire accidents at home and abroad in recent years, the causes and characteristics of cable tunnel fire accidents are summarized and the various fire extinguishing systems are introduced, such as water spray fire extinguishing system, high-pressure water mist fire extinguishing system, gas fire extinguishing system, aerosol fire extinguishing system and ultra-fine dry powder extinguishing system. According to the analysis of technology and economics, it is recommended to adopt the high-pressure water mist fire extinguishing system in the long-distance and large-volume cable tunnels, and the ultra-fine dry powder fire extinguishing system is recommended in the cable joints or other key protection areas for local fire extinguishing. However, it is not recommended to use gas fire extinguishing system, water spray fire extinguishing system and aerosol fire extinguishing system in long-distance and large-volume cable tunnels.

**Key words:** cable tunnel; utility tunnel; fire accident; fire extinguishing system

## 0 引言

随着中国社会和经济的快速发展,城市电力输送逐渐由地上架空线路向地下隧道深入发展。电缆隧道可抵御外界恶劣气候的影响,极大地提高了城市输电线路维护保养的便利性,也有效缓解了地面空间紧缺的压力。截至2021年年底,国网四川省电

力公司成都供电公司共有地下电缆8467 km,其中110 kV及以上电缆1473 km,电缆隧道310 km,长度排名全国第二,仅次于北京。然而,电缆隧道具有空间封闭性、潜在可燃物较多、火灾扑救难度大等特点,一旦发生火灾就会造成严重后果,严重威胁城市电网的安全运行<sup>[1-2]</sup>。2020年5月4日凌晨,位于西安市高新区的地下隧道综合体工程施工现场内电缆桥架起火,多条电缆线路故障,造成周边区域约

6000 户用户停电。2009 年 2 月 10 日,昆明市区东南部由于高压电缆外护套被盗引发短路起火,造成两回 220 kV 电缆、两回 110 kV 电缆烧损,220 kV 官渡变电站等多个变电站全站失压,导致昆明市区东南部发生大面积停电,影响恶劣。因此研究电缆隧道火灾事故发生的原因和特点,分析电缆隧道灭火系统的适用性,有利于预防电缆隧道火灾,减少电缆隧道火灾事故造成的损失和影响。

## 1 电缆隧道火灾事故原因分析

电缆隧道内存在较多的可燃物,主要包括电缆护套层、绝缘层材料及电缆接头中的环氧树脂等可燃物,引起电缆隧道发生火灾的原因可分为电缆自身故障引起着火和外界因素引发着火。据相关研究统计,约 30% 的电缆隧道火灾事故源于电缆自身故障,其余约 70% 的事故由外界因素引起<sup>[3-5]</sup>。

电缆自身故障主要包括 3 个方面:1) 电缆接地不良或短路。电缆接地不良导致电缆护套层悬浮电压升高,击穿绝缘的电弧可能引燃电缆,发生火灾。电缆受水浸渍或其他原因导致电缆发生接地和短路事故时,过电流将引起电缆过热而自燃。2) 电缆及其附件质量或施工工艺不达标。电缆本身质量不达标,或电缆接头因制造、安装工艺不良等,可能导致运行中电缆接头氧化、局部发热或爆炸引起火灾。3) 电缆绝缘老化或长期过负荷运行。电缆使用寿命一般为 15~20 年,运行时间的增加会使其逐渐老化,容易引起自燃。此外,长期过负荷运行也将损坏电缆绝缘,容易造成电缆短路起火。

外界因素较为复杂,主要包括 3 个方面:1) 施工引起的焊接火花飞溅或机械性损伤。施工过程中,电气焊接产生的火花飞溅,可能会引起电缆火灾;外力导致的电缆机械性损伤,可能导致接地故障并引发火灾。2) 外部火灾蔓延引燃。电缆隧道防火措施不完善,可能造成外部火灾侵入,引燃电缆从而扩大火灾事故。3) 鼠害。电缆隧道内冬暖夏凉,是老鼠的“理想”栖息地,电缆容易被老鼠咬坏并造成接地或短路起火。

## 2 电缆隧道火灾事故特点

电缆隧道属地下建筑物,无法自然采光,且为狭长的管道空间。这些建筑构造特点决定其火灾事故主要呈现以下特点:

1) 起火点隐蔽,初期难以被发现。封闭性是电缆隧道的基本特点,而且其空间结构形式复杂多样,使起火点的位置在火灾初期无法被及时发现,因此难以对初期火灾采取有效的灭火措施,也无法对其进行有效控制,最终可能造成严重后果。

2) 气热难以扩散,火灾蔓延速度快。电缆隧道发生火灾事故后,受到地形等自然因素限制,产生的气热难以快速扩散,烟气积聚达到一定阈值后会出现爆燃的情况。由于电缆堆叠密集布置、可燃物连续排列、通道狭小热量不易排出等特点,火势会沿着电缆线迅速蔓延燃烧。电缆燃烧过程中还会释放出大量高浓度可燃气体和浓烟,在隧道内特定气流作用下,温度、浓烟急剧上升,将进一步加速火势的蔓延。实验表明,电缆火灾传播速度一般可达 20 m/min,即使在电缆发生爆炸后迅速切断电源,也难以控制火势<sup>[6]</sup>。

3) 空间狭窄,灭火难度大。一方面,电缆隧道内部具有较大的纵深且空间狭窄,电缆桥架密集堆放,影响灭火救援行动的实施;另一方面,电缆隧道封闭且照明条件差,发生火灾时,隧道内迅速充满有毒有害气体(一氧化碳和氯化氢等),能见度低,严重危害救援人员身体健康并影响灭火救援行动。因此,电缆隧道一旦着火,灭火抢救非常困难。

4) 损失严重,恢复困难。电缆隧道着火,常常会造成严重的火灾,不仅烧毁大量的电缆和电气设备,还会引发大范围的停电,严重影响人们的生产生活。电缆隧道发生火灾,后期修复难度极大、时间长,也会造成巨大的经济损失。

## 3 电缆隧道灭火系统比较分析

目前,比较成熟的灭火系统种类较多,主要有水喷雾灭火系统、高压细水雾灭火系统、气体灭火系统、气溶胶灭火系统、超细干粉灭火系统等,其中在电缆隧道和综合管廊电力舱中应用业绩较为成熟的是高压细水雾灭火系统和超细干粉灭火系统等<sup>[7-10]</sup>。下面将从灭火机理、灭火性能、空间利用和成本等方面综合比较分析几种灭火系统的优劣,从而结合电缆隧道火灾特点及投资选用合适的灭火系统。

### 3.1 水喷雾灭火系统

水喷雾灭火系统技术相对比较成熟,适用范围广,灭火机理主要为表面冷却、窒息、乳化及稀释等作用。相比其他灭火系统,水喷雾灭火系统具有设备简单、灭火速度快、不复燃、可靠性高、持续灭火能

力强等特点,但存在系统用水量大、消防后需大量排水,可能影响电力电缆的绝缘性等不足<sup>[7,11-12]</sup>。电缆隧道空间狭长且封闭,不适合铺设大直径水喷雾灭火系统,并且由于无法及时排除大量积水及影响电缆绝缘性等不足,不建议在电缆隧道中使用水喷雾灭火系统。

### 3.2 高压细水雾灭火系统

高压细水雾是通过向特殊的喷嘴加压,使水在空间中形成细小的水雾状态(微米级尺寸),隔离火焰和被保护对象,通过吸热、表面冷却、隔离、窒息等综合作用实现灭火。与其他灭火系统相比,高压细水雾具有用水量少、灭火效果好、可扑救电气火灾等优点,在电力设施灭火系统中有着广泛的应用,但也存在前期安装成本高、安装工艺复杂、对水质和管材要求高等不足。

文献[13]选取“雾滴粒径”为研究对象,依据相关地下综合管廊电力舱的设计参数,采用数值模拟方法,研究了“雾滴粒径”对电缆桥架底层火场温度、灭火时间和火灾热释放速率的影响规律,提出在实际工程中采用粒径为75~100 μm的高压细水雾灭火系统具有较好的灭火效果。文献[14]则研究了雾滴粒径对I型结构地下综合管廊灭火效果的影响。通过火灾数值模拟,分析了温度场、烟气流动以及能见度变化情况,实验结果表明雾滴粒径越小对烟层沉降的影响越显著。在研究的6种粒径细水雾中,50 μm高压细水雾灭火效果最好,200 μm高压细水雾降温效果最快。

文献[15]利用FDS建立了全尺寸综合管廊模型,研究了高压细水雾灭火系统喷头压力对灭火效率的影响,实验结果表明:适当增加喷头压力有利于提高灭火效率,但喷头压力过大可能导致最大热释放速率波动变大,不利于灭火;当喷头压力为17 MPa时,灭火效果最好。文献[16]在自建的综合管廊实体火灾试验平台上,开展了不同工况下的高压细水雾灭火系统局部应用与全淹没应用的灭火试验研究,结果表明:对于综合管廊电力舱,宜采用全淹没灭火方式的高压细水雾灭火系统;若采用局部灭火方式,需同时对着火分区与相邻分区喷射细水雾,并保证一定的喷雾强度和灭火区间。文献[7]则从技术性能、设计方案和全生命周期成本等3个方面对常用的几种灭火系统进行了对比分析,结果表明高压细水雾灭火系统在设计使用合理性、灭火性能和全生命周期成本方面均具有优势。

研究者们对高压细水雾灭火系统的雾滴粒径、

喷头压力、管网布置和安装成本等重要影响因素进行了深入研究,结果表明高压细水雾灭火系统在综合灭火效果、性价比以及设计适用合理性等方面均具有显著优势,也是目前在电缆隧道中应用较为广泛和成熟的灭火系统<sup>[17-19]</sup>。

### 3.3 气体灭火系统

气体灭火系统是以气体作为灭火介质,绝大部分为全淹没应用灭火方式,在密闭空间内灭火效果好。尽管二氧化碳及六氟丙烷灭火系统可用于开放空间的局部应用灭火,但所需灭火剂浓度较高。目前,气体灭火介质很多,主要有二氧化碳、七氟丙烷、IG541混合气体和全氟己酮等,其中七氟丙烷灭火介质具有较高的性价比,市场占有率高达47%,是中国目前应用最多的气体灭火介质<sup>[20]</sup>。气体灭火系统具有清洁无残留、密闭空间灭火效率高等优点,但也存在储瓶间占地面积大、全生命周期成本高、无法扑灭复燃火灾等不足。

文献[20]以全氟己酮灭火剂局部应用灭火技术为研究对象,对旋芯喷嘴的雾化特性进行了深入研究,结果表明:温度升高、雾化半角变大、粒径变小等均会导致灭火流量增大,其中雾化半角对灭火流量的影响最为显著;根据实体灭火模型计算结果,局部应用高度在3.5~5.0 m区间内灭火流量较低,能够实现可靠灭火。文献[21]对比了备压式和储压式两种七氟丙烷灭火系统的特点和应用区别,结果表明备压式七氟丙烷灭火系统更适合用于城市综合管廊,具有输送距离更远(可达200m)、充装密度更大、输送能力更强、资金投入相对较低等优势。文献[7]从防火分区内气体灭火系统配置、全生命周期成本等方面,详细对比了气体灭火系统和其他常见灭火系统在电力电缆舱室的应用特点,相关数据结果表明七氟丙烷等气体灭火系统占地空间大、药剂量大,不宜保护长距离电缆隧道和综合管廊,此外还存在资金投入高等不足。因此,目前气体灭火系统主要应用于短距离封闭空间内的全淹没应用灭火,但不适用于保护长距离、大容积的电缆隧道和综合管廊,几乎无相关应用业绩,不建议在电缆隧道中使用气体灭火系统。

### 3.4 气溶胶灭火系统

目前,气溶胶灭火系统根据灭火药剂不同主要分为S型和K型。其中K型气溶胶灭火分解产物和喷射物吸水后会生成氢氧化钾,对电缆隧道内的设备具有腐蚀作用,此外其喷射物中的金属离子具有一定的导电性,可能导致线路短路,因此不适用于

电缆隧道。S 型气溶胶以锶盐类物质为主氧化剂,其分解产物的吸湿性较小,不会产生腐蚀性物质,通常采用全淹没应用灭火方式,灭火效果较好,前期安装方便、空间占用体积小,但存在后期维护成本高、设备故障率高、保护容积有限等不足,且不具备强制性产品认证制度(3C 认证),因此不推荐在长距离、大容积的电缆隧道内使用<sup>[9,12,19]</sup>。

### 3.5 超细干粉灭火系统

超细干粉成分为磷酸铵盐,灭火剂的主要颗粒粒径不大于 20  $\mu\text{m}$ ,具有较好的流动性、弥散性、抗复燃性和电绝缘性,可扑救 A、B、C 类火灾及带电电气火灾。灭火机理为化学和物理双重灭火,以化学灭火为主。超细干粉与燃烧物火焰发生化学反应,捕获燃烧自由基及热量,切断燃烧链,迅速熄灭火焰;超细干粉还可隔绝空气与被保护物,通过物理作用防止复燃。相比其他灭火系统,超细干粉灭火系统具有灭火能力强、安装方便、初期成本低等优点,但存在后期维护成本高、灭火后难以清理、可能破坏电缆绝缘等不足。

文献[22]基于实际工程对悬挂式超细干粉和高压细水雾两种灭火系统的技术性能、参数配置、费用等进行了详细对比,研究结果表明:长度小于 2 km 的综合管廊宜采用悬挂式超细干粉自动灭火系统;长度大于 2 km 的综合管廊宜采用高压细水雾灭火系统。文献[23]整理了目前综合管廊消防保护相关标准规范,总结分析了干粉灭火装置在综合管廊的应用情况,从干粉灭火装置特点出发,提出了其在管廊内应用的设计方法和应用优缺点;但针对灭火后难以清理、后期维护费用高等不足仍未提出很好

的解决方法。综合来看,超细干粉灭火系统在短距离或电缆接头等局部灭火应用上具有一定优势,但不适合保护长距离、大容积的电缆隧道。

### 3.6 其他新型灭火系统

压缩空气泡沫灭火系统是近年来新发展的灭火系统,其基本原理是向泡沫混合液中通入一定比例的压缩空气,充分混合后产生灭火泡沫再经管路输出。与传统的吸气式泡沫灭火技术相比,压缩空气泡沫灭火技术具有灭火效率高、环境污染小、防复燃能力强等优点,适用于扑救电缆接头火灾。但目前压缩空气泡沫系统还没有相应的国家规范,应用受限,其产品设计与电气火灾应用拓展等还有待深入研究<sup>[24]</sup>。文献[25]对液氮扑灭综合管廊电缆火灾的适用性进行了实验研究,结果论证了液氮扑灭综合管廊火灾的有效性。但目前液氮灭火系统面临费用昂贵、技术不成熟等不足,不适用于长距离、大容积电缆隧道的高效灭火,有待进一步发展。

### 3.7 各灭火系统技术比较

各灭火系统技术比较如表 1 所示。

## 4 结 论

上面总结了电缆隧道火灾事故的原因和特点,综述并分析了目前应对电缆隧道火灾的各种消防灭火系统及其适用性。分析主要从灭火性能、空间利用、喷射后处理和全生命周期成本等方面开展,所得主要结论如下:

1) 高压细水雾灭火系统在综合灭火效果、性价比以及电缆隧道适用性等方面均具有较大优势,尤

表 1 各灭火系统技术比较

对比项	水喷雾灭火系统	高压细水雾灭火系统	气体灭火系统	气溶胶灭火系统	超细干粉灭火系统
灭火性能	好	好	一般	一般	一般
降温性能	好	好	差	差	差
除烟性能	好	好	差	差	差
灭火时间	一般	快	一般	快	快
防复燃能力	好	好	差	一般	一般
电气绝缘性	差	好	好	一般	一般
系统布置	可局部保护,也可全线布置。	可局部保护,也可全线布置,但系统对水质和管材要求高。	全线布置,不可局部保护。	可局部保护,也可全线布置。	可局部保护,也可全线布置。
喷射后处理	需排水	无需排水,需通风	需通风	需清理残留粉末	需清理残留粉末
3C 认证体系	有	有	有	无	有
全生命周期成本	低	一般	高	高	高
电缆隧道适用性	差	好	差	一般	一般

其适用于保护长距离、大容积的电缆隧道,是目前在电缆隧道中应用业绩较为成熟的灭火系统。

2) 水喷雾系统尽管具有降温除烟效果好、绿色环保、全生命周期成本低等优点,但其占地面积大、喷射后需排水等不足导致其在电缆隧道适用性较差;气体灭火系统具有钢瓶数量多、占地面积大、全生命周期成本高、无法扑灭复燃火灾等不足;气溶胶灭火系统虽然前期安装方便,但存在后期维护成本高、设备故障率高、不具备强制性产品认证制度(3C认证)等不足。因此不建议在长距离、大容积的电缆隧道中使用水喷雾灭火系统、气体灭火系统和气溶胶灭火系统。

3) 超细干粉灭火系统在设计上具有可行性,可用于电缆接头等故障多发区域的局部灭火应用,但由于其全生命周期成本高、需清理残留粉末等不足,性价比在长距离、大容积电缆隧道保护上不如高压水喷雾灭火系统。

总的来说,不同的灭火系统各有其优缺点,适用场景和范围也各有不同,因此在实际工程中应根据电缆隧道的实际情况和特点综合选用合适的灭火系统。近年来,随着科学技术的快速发展,各种新型灭火系统不断涌现,如压缩空气泡沫、液氮等灭火系统,为电缆隧道灭火应用提供了更多选择,但这些新型灭火系统在灭火效能、全生命周期成本、降温除烟性能等方面还有待进一步完善和改进。

#### 参考文献

- [1] 张佳庆,李文杰,范明豪,等.城市电力电缆隧道消防安全评估研究[J].武汉理工大学学报(信息与管理工程版),2020,42(2):109-114.
- [2] 郝振昆,刘安畅,周菲.电缆隧道消防安全管理问题及对策研究[J].中国电力企业管理,2020(32):76-78.
- [3] 陈孝湘,鄢庆锰,李扬森.高压电缆通道火灾起因分类及其预防措施分析[J].建筑技术开发,2019,46(11):72-73.
- [4] 王娟娟,袁伟衡,刘月,等.北京市既有电力隧道发展现状与常见灾害分析[J].工程质量,2016,34(11):75-78.
- [5] 黄鑫,阚强.高压电缆搭载交通隧道的火灾危险性及防火措施[C]//2020中国消防协会科学技术年会论文集.西安:中国消防协会,2020:661-665.
- [6] 刘爽,黄自元,李剑,等.细水雾消防系统在电缆隧道中的应用[J].公路隧道,2007(3):59-60.
- [7] 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.
- [8] 李青涛,许萍,李嘉乐,等.综合管廊适用灭火技术比较与探讨[J].城市建筑,2021,18(29):131-134.
- [9] 王若云,崔文静,余一.高压细水雾系统在综合管廊电缆火灾消防中的应用[J].市政技术,2021,39(5):114-119.
- [10] 黄自元,甄兰兰,杨旭红.电缆隧道灭火技术应用研究[J].上海电力学院学报,2008,24(4):377-380.
- [11] 欧阳卫华.城市地下综合管廊自动灭火系统设计研究[J].隧道与轨道交通,2018(1):35-38.
- [12] 张雯,陈苗苗,艾庆升.城市地下综合管廊消防系统的对比分析[J].建材与装饰,2017(40):169.
- [13] 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.
- [14] 张华杰,梁天水.细水雾粒径改变对电缆火灾的影响[J].科学技术与工程,2021,21(32):14022-14027.
- [15] 吴亚倩,胡祖祥.综合管廊电缆火灾细水雾灭火性能研究[J].工业技术创新,2021,8(5):13-17.
- [16] 徐大军,张晋,陶鹏宇,等.基于综合管廊火灾特性的细水雾灭火系统应用研究[J].消防科学与技术,2021,40(11):1625-1630.
- [17] 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.
- [18] 白静.浅谈高压细水雾灭火技术在综合管廊消防的应用[J].智能建筑与智慧城市,2018(4):36-37.
- [19] 孙瑞雪.城市地下综合管廊灭火系统的实验与数值模拟研究[D].安徽:中国科学技术大学,2018.
- [20] 姜学磊,董海斌,刘连喜,等.全氟己酮灭火剂局部应用灭火技术研究[J].消防科学与技术,2021,40(2):255-258.
- [21] 林帅,周博,田鹏,等.城市综合管廊自动灭火系统选用探讨[J].消防界(电子版),2016(6):65-66.
- [22] 席林,郭俊,李琰.综合管廊自动灭火系统选择[J].给水排水,2018,54(S2):200-204.
- [23] 高云升,刘连喜,廖荣华,等.干粉灭火装置在综合管廊内应用分析[J].消防科学与技术,2018,37(12):1682-1684.
- [24] 时彦霞,周东凯,王越超,等.压缩空气泡沫灭火装置在地下电缆沟中的应用[J].现代制造技术与装备,2021,57(7):170-171.
- [25] 李华祥.城市综合管廊液氮灭火可行性实验研究[D].徐州:中国矿业大学,2021.

#### 作者简介:

曾晓亮(1991),男,博士,工程师,主要从事六氟化硫气体分析检测、电网消防检测工作。

(收稿日期:2022-04-18)