“十三五”国家重点出版物出版规划项目

绿色建筑消防安全技术

城市交通隧道火灾蔓延控制

张泽江　刘　微　李平立　颜明强　蒋亚强
何勤理　张文华　冯小军　杨　猛　李　伟　著

西南交通大学出版社

·成都·

图书在版编目（CIP）数据

城市交通隧道火灾蔓延控制／张泽江等编. —成都：西南交通大学出版社，2020.11
（绿色建筑消防安全技术）
“十三五”国家重点出版物出版规划项目
ISBN 978-7-5643-7725-0

Ⅰ. ①城… Ⅱ. ①张… Ⅲ. ①公路隧道－火灾－灾害防治 Ⅳ. ①U459.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2020）第 195214 号

“十三五”国家重点出版物出版规划项目
绿色建筑消防安全技术

Chengshi Jiaotong Suidao Huozai Manyan Kongzhi
城市交通隧道火灾蔓延控制

张泽江　刘　微　李平立　颜明强　蒋亚强
何勤理　张文华　冯小军　杨　猛　李　伟　著

出版人	王建琼
责任编辑	李　伟
封面设计	墨创文化
出版发行	西南交通大学出版社 （四川省成都市金牛区二环路北一段 111 号 西南交通大学创新大厦 21 楼）
发行部电话	028-87600564　028-87600533
邮政编码	610031
网址	http：//www.xnjdcbs.com
印刷	四川煤田地质制图印刷厂
成品尺寸	170 mm×230 mm
印张	7
字数	125 千
版次	2020 年 11 月第 1 版
印次	2020 年 11 月第 1 次
书号	ISBN 978-7-5643-7725-0
定价	58.00 元

图书如有印装质量问题　本社负责退换
版权所有　盗版必究　举报电话：028-87600562

前　言

城市交通隧道在城市交通运输中承担着重要的枢纽作用。因受空间、视线、光线、驾驶员异常心理和行为等因素影响，隧道内极易发生各种交通事故，引起火灾；且城市交通隧道普遍位于城市交通密集区域，车流量大，人员密集，车辆发生故障起火或车载货物自燃概率也较非交通密集区域更高。城市交通隧道一旦发生火灾，极易造成群死群伤、巨额财产损失、隧道结构破坏及交通长期中断等严重后果，导致极为严重的社会影响。

细水雾灭火技术具有无污染、灭火迅速、耗水量低、介质价格低廉、对防护对象破坏性小等特点，适用于人员、车辆密集的城市交通隧道安全保护，将逐渐成为未来城市交通隧道灭火保护系统的主要选择之一。

本书以细水雾灭火系统在城市交通隧道中的应用为切入点，深入探讨细水雾灭火系统对隧道火灾发展和蔓延的抑制作用及其影响，围绕细水雾灭火系统对城市交通隧道火灾抑火、控火、灭火作用的高效化、节能化、人性化需求，完善细水雾灭火系统对城市交通隧道实施灭火、控火保护的措施与细节。

本书结合隧道实体火灾燃烧特点及细水雾灭火系统隧道实体火灾试验，就由此开发研制的城市交通隧道专用细水雾添加剂、高压细水雾灭火系统、高压细水雾消火栓等一系列产品的灭火、控火效果进行验证与剖析，并明确压缩空气泡沫炮系统控制城市交通隧道火灾蔓延的效果，旨在为城市交通隧道构建一套较为系统全面的火灾蔓延高效抑制保护体系。

本书由“国家重点研发计划项目”（项目编号：2016YFC080060404）资助，由应急管理部四川消防研究所阻火、防火科室及企业的相关研究人员组织编写。

由于作者学识有限，书中难免存在不足之处，恳请读者批评指正。

作　者

2020 年 4 月

目　录

第 1 章　绪　论 …… 3

1.1　城市交通隧道现状 …… 3

1.2　国内外标准、规范对城市交通隧道固定灭火系统的设置要求 …… 6

1.3　公路隧道细水雾灭火系统的国内外研究现状及应用情况 …… 8

第 2 章　细水雾灭火添加剂的研究 …… **错误!未定义书签。**

2.1　概　述 …… **错误!未定义书签。**

2.2　试验原料与表征方法 …… **错误!未定义书签。**

2.3　无机物类细水雾添加剂 …… **错误!未定义书签。**

2.4　有机表面活性剂类细水雾灭火添加剂制备与性能研究**错误!未定义书签。**

2.5　本章小结 …… **错误!未定义书签。**

第 3 章　城市交通隧道专用高压细水雾灭火系统的研制 …… **错误!未定义书签。**

3.1　概　述 …… **错误!未定义书签。**

3.2　系统的设计研发 …… **错误!未定义书签。**

3.3　系统性能测试 …… **错误!未定义书签。**

3.4　本章小结 …… **错误!未定义书签。**

第 4 章　城市交通隧道高压细水雾消火栓系统的研制 …… **错误!未定义书签。**

4.1　概　述 …… **错误!未定义书签。**

4.2　高压细水雾消火栓系统 …… **错误!未定义书签。**

4.3　高压细水雾消火栓系统性能测试 …… **错误!未定义书签。**

4.4　本章小结 …… **错误!未定义书签。**

第 5 章　城市交通隧道细水雾灭火系统实体火灾试验研究 错误!未定义书签。

5.1　概　述 ……错误!未定义书签。
5.2　试验设计 ……错误!未定义书签。
5.3　试验结果 ……错误!未定义书签。
5.4　20 MW 模拟分析 ……错误!未定义书签。
5.5　本章小结 ……错误!未定义书签。

第 6 章　城市交通隧道压缩空气泡沫炮系统实体火灾试验 错误!未定义书签。

6.1　概　述 ……错误!未定义书签。
6.2　试验部分 ……错误!未定义书签。
6.3　试验数据分析与处理 ……错误!未定义书签。
6.4　本章小结 ……错误!未定义书签。

参考文献 …… **错误!未定义书签。**

第1章 绪 论

1.1 城市交通隧道现状

城市交通隧道是修建于城市区域内供行人和机动车辆通行的公路隧道，在城市交通运输中承担着重要的枢纽作用。据交通运输部的交通运输行业发展统计公报显示，我国公路隧道数量逐年递增（见图 1-1），至 2018 年年底，全国公路隧道 17 738 处、1 723.61 万米，比上年增加 1 509 处、195.10 万米，其中特长隧道 1 058 处、470.66 万米，长隧道 4 315 处、742.18 万米。统计数据虽未明确区分山岭公路隧道、城市道路隧道，但随着城市化建设进程的快速推进，城市交通隧道作为满足城市区域交通需求的重要手段，其发展建设也是必不可少，不容忽视的。

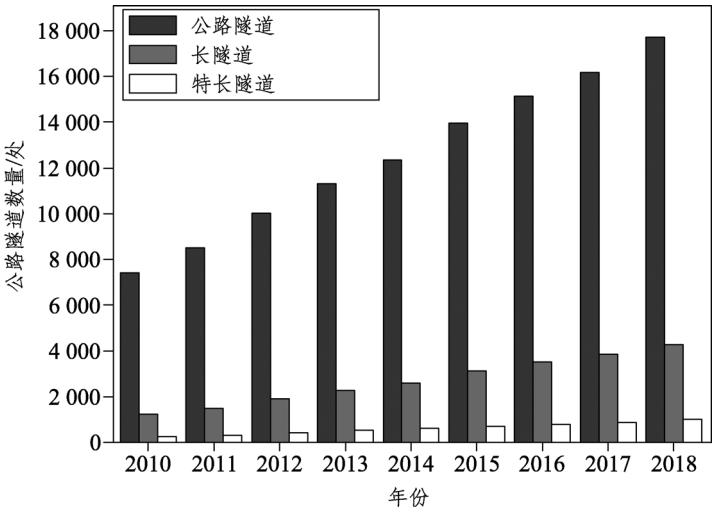

图 1-1　2010—2018 年我国公路隧道发展情况

国内现已建成大量城市交通隧道，如上海外环路隧道、上海翔殷路隧道、上海延安东路隧道、上海人民路隧道、上海复兴东路隧道、上海西藏南路隧道、上海打浦路隧道、上海上中路隧道、上海长江路隧道、杭州紫之隧道、杭州庆春路过江隧道、杭州富春江城市隧道、杭州钱江隧道、厦门翔安海底隧道、青岛胶州湾海底隧道、武汉长江隧道、南京长江隧道、南京玄武湖隧道、北京金融街地下车行系统、北京奥林匹克公园地下交通联系通道、北京 CBD（中央商务区）核心地下输配环工程、天津现代服务产业区地下交通工程、重庆解放碑金融街地下环道、成都大源地下环形车道、广州珠江新城地下环道等。

城市交通隧道承担着重要的枢纽作用，属于特殊路段和“瓶颈”路段，隧道内因行车受空间、视线、光线、驾驶员异常心理和行为等因素影响，极易发生各种交通事故，引起火灾；同时城市交通隧道普遍位于城市交通密集区域，车流量大，人员密集，容易因车辆碰撞等交通事故而引发火灾，车辆故障起火或车载货物自燃的概率也较非交通密集区域更高。城市交通隧道一旦发生火灾，极易造成群死群伤、巨额财产损失、隧道结构破坏及交通长期中断等严重后果，直接危及社会和人民生命财产安全。目前，诱发公路隧道火灾的原因主要有发动机自燃、轮胎起火、线路故障、货物自燃及碰撞起火等。

随着城市交通隧道的大规模修建和使用，其发生火灾的风险概率也不断增加。近年来，国内外发生了多起重大公路隧道火灾事故，造成的人员伤亡惨重，经济损失巨大，产生了极为严重的社会影响。国内近年来部分城市交通隧道火灾见表 1-1。

表 1-1　国内近年来部分城市交通隧道火灾

时间	隧道名称	火灾情况	火灾原因
2010 年 7 月 4 日	无锡惠山隧道	在该隧道内，无锡市某钢铁公司夜班接送客车起火，造成 24 人死亡，19 人受伤	客车自燃
2012 年 10 月 26 日	武汉长江隧道东线隧道	一辆轿车自燃，隧道工作人员处置及时，12 min 后将火扑灭，无人员伤亡	自燃
2013 年 5 月 15 日	南宁青林隧道	轿车自燃	自燃

续表

时间	隧道名称	火灾情况	火灾原因
2014 年 6 月 5 日	大连甘井子区椒金山隧道	一辆越野车自燃，大量浓烟灌满隧道，数十辆车被困隧道	自燃
2015 年 2 月 1 日	厦门环岛干道金山寨隧道	轿车失控冲向隧道壁，碰撞后起火，事故造成 1 人死亡	碰撞起火
2015 年 12 月 18 日	武汉二环线水果湖隧道	一辆轿车自燃起火，将轿车烧成空壳，还引燃了隧道两侧的隔音屏和隧道顶棚。事故导致隧道双向交通临时封闭，交通出现拥堵，无人员伤亡	自燃
2017 年 5 月 9 日	威海市环翠区陶家夼隧道	校车起火燃烧，车上 11 名儿童遇难，司机当场死亡，随车女教师经抢救无效离世	司机纵火
2018 年 3 月 17 日	大连甘井子区椒金山隧道	车辆追尾，导致前车起火	追尾碰撞起火
2018 年 5 月 27 日	长沙营盘路隧道	三车追尾引发火灾，火灾造成隧道入口处约 6 m 长防护板被烧黑，部分电灯、电线等被烧毁，甚至沥青路面也有烧痕	追尾碰撞起火
2018 年 6 月 6 日	无锡惠山隧道	隧道内由南向北方向一辆小轿车起火	自燃
2018 年 8 月 2 日	杭州紫金港路隧道	隧道东侧的风机电源控制柜起火	—
2018 年 11 月 9 日	重庆沙坪坝双碑隧道	一辆行驶中的越野车突然起火，造成该路段交通拥堵	自燃

因此，应根据城市交通隧道特点合理设置消防设施。目前，国内外均已开展城市交通隧道火灾特性及防火、灭火试验研究，并制定了相关的技术要求和标准。与国外发达国家相比，我国隧道建设起步较晚，公路隧道消防相关标准、规范还不完善，尤其是针对城市交通隧道的灭火系统设置与要求并不明确。

1.2 国内外标准、规范对城市交通隧道固定灭火系统的设置要求

国内现有标准对公路隧道的结构耐火、火灾探测报警、消防给水等做出了具体规定，如《建筑设计防火规范》（GB 50016—2014）规定隧道内消火栓用水量不应小于 20 L/s，出水口压力不大于 0.5 MPa，但对公路隧道固定灭火系统的设置与要求并不明确。国家标准《公路隧道消防技术规范》尚未正式颁布，行业标准《公路隧道设计规范 第二册 交通工程与附属设施》也仅要求 A+、A 级公路隧道必须设置固定式水成膜泡沫灭火装置。《建筑设计防火规范》对城市交通隧道内设置自动喷水灭火系统也无明确要求。国内最早的消防技术规范是云南省地方标准《公路隧道消防设计施工管理技术规程》，但也只规定 I 级隧道应设置水成膜泡沫灭火装置，并未提及固定自动灭火系统在隧道中的应用。而上海、湖南、北京的地方标准则对部分公路隧道设置固定灭火系统作了要求。国内外相关标准、规范对公路隧道设置固定灭火系统的要求如表 1-2 所示。

表 1-2　国内外相关标准、规范对公路隧道设置固定灭火系统的要求

国家	标准名称	是否设置	设置类型和要求
日本	《设计原则 第三卷（隧道）第四部分：隧道安全设备》	是	AA 类隧道（≥10 km），长度在 3 km 以上、交通量大于 4 000 辆/d 的 A 类双向隧道需要设置水喷雾灭火系统
澳大利亚	《公路隧道消防安全导则》	是	优选开式水喷淋系统；灭火系统要有 30～60 s 延迟；如果设置泡沫灭火系统，要基于火灾预期来确定泡沫液和水的持续时间
奥地利	《公路设计导则和规程》	是	水喷淋系统，采用人工启动
美国	NFPA 502（2017 版）	推荐	对隧道内设置水基固定式灭火系统的安装进行了推荐，并未强制要求采用某一种固定灭火系统

续表

国家	标准名称	是否设置	设置类型和要求
中国	《公路隧道设计规范 第二册 交通工程与附属设施》	是	A+、A 级公路隧道必须设置固定式水成膜泡沫灭火系统
中国	《建筑设计防火规范》	未要求	
中国	《公路隧道消防设计施工管理技术规程》（云南）	否	Ⅰ级隧道应设置水成膜泡沫灭火装置，泡沫混合液供给强度不应小于 5.0 L/（min · m^2），连续供水时间不应小于 30 min，设置间距不应大于 50 m
中国	《道路隧道设计规范》（上海）	是	一级隧道需设置泡沫-水喷雾联用系统；二级隧道需设置水喷雾系统或泡沫-水喷雾联用系统；三级和四级隧道应设泡沫消火栓
中国	《公路隧道消防技术规范》（湖南）	是	Ⅰ级隧道行车主隧道应设泡沫喷淋系统或细水雾灭火系统；Ⅱ级隧道行车主隧道宜设泡沫喷淋系统或细水雾灭火系统；泡沫-水喷雾联用系统喷雾强度不应小于 6.5 L/（min · m^2），最不利点喷头工作压力不应小于 0.35 MPa，泡沫混合液持续时间不应小于 20 min，喷雾持续时间不应小于 60 min；细水雾灭火系统最小喷雾强度不应小于 3 L/（min · m^2），喷雾时间不应小于 60 min，从系统启动到最不利喷头出水的时间不应大于 60 s
中国	《城市地下联系隧道防火设计规范》（北京）	是	一类、二类隧道及三类隧道中的Ⅰ类隧道宜设置水喷雾灭火系统或泡沫-水喷雾联用灭火系统

1.3 公路隧道细水雾灭火系统的国内外研究现状及应用情况

目前，国内外应用于公路隧道的自动灭火系统主要有水喷淋灭火系统、水喷雾灭火系统、泡沫-水喷雾灭火系统、压缩空气泡沫灭火系统、细水雾灭火系统等。这些灭火系统各有其优缺点，如水喷淋灭火系统较为简单、安装维护成本较低，但用水量大，灭火和降温冷却效果一般。压缩空气泡沫灭火系统和泡沫-水喷雾灭火系统的灭火和降温冷却效果都较好，但系统都较复杂，安装维护成本高，并且两套系统都存在以下问题：① 泡沫液腐蚀性能强，隧道消防管道和排水设施易被腐蚀；② 喷射后产生的大量泡沫堆积在废水泵房，影响排水系统正常使用。而细水雾灭火系统较压缩空气泡沫灭火系统和泡沫-水喷雾灭火系统简单，安装维护成本相对较低，用水量小，降温冷却、抑火、控火效果好，且作为灭火介质的水腐蚀性比泡沫液低，因此，细水雾灭火系统在公路隧道中的应用受到广泛的关注和研究，国外相关消防研究机构和企业开展了大量关于公路隧道细水雾技术的全尺寸火灾试验研究。

1999 年，在法国—意大利勃朗峰隧道和奥地利 Tauern 隧道相继发生重大火灾后，欧洲部分消防研究机构和企业针对是否在公路隧道内应用固定灭火系统开展了一系列全尺寸试验研究[1-3]，其中就有不少试验涉及了细水雾灭火系统，具体如表 1-3 所示。

UPTUN 项目组在挪威 IF 隧道开展了 19 组低压细水雾灭火试验和 56 组高压细水雾灭火试验，火源为柴油油池火、木托盘火或交通工具引起的火灾。在大多数试验中，细水雾灭火系统仅控制了火势，并没有熄灭火灾。总体而言，细水雾灭火系统对油池火抑制效果要优于对木托盘火抑制效果。对于木托盘火，低压细水雾灭火系统可减少 40%的热释放速率，而高压细水雾灭火系统可减少 50%～80%的热释放速率。研究结果显示，细水雾灭火系统对熄灭小规模火灾（如小于 5 MW）有效性低，但能够抑制住大规模火灾，使其燃烧速率大幅降低。2005 年，该项目组又于意大利 Virgil/Virgolo 隧道开展了 3 组全尺寸火灾试验，其中一组试验目的即为测试细水雾灭火系统对隧道火灾的抑制效果。试验中测量了隧道混凝土结构的温度和 CO 气体含量，结果表明，细水雾灭火系统对火灾本身的抑制效果并不明显。隧道内的 CO 含量增大，但试验中隧道混凝土结构的温度未达到 100 °C，证明细水雾灭火系统对隧道有瞬态降温

效果，可用作隧道结构保护系统。

表 1-3　全尺寸公路隧道细水雾灭火系统试验总结

试验隧道	研究项目或机构	年份	数目	系统类型	隧道尺寸（$L\times W\times H$）/m	分区长度/m	工作压力/MPa	喷水强度/（mm/min）	启动时间/min	风速/（m/s）	火源	热释放速度（HRR）/MW
IF 挪威	UPTUN 项目	2002—2004	19 56	低压 高压	马蹄形 100×8×6	24 36	0.5～0.9 6～12	1.1～3.3 0.5～2.3	多数为 2 或 3	3	柴油油池、木托盘、车辆	2～25
IF 挪威	Marioff 公司	2004	24	高压	马蹄形 100×8×6	24	—	1.4～3.7	2 或 3	3	柴油油池和木托盘	5～25
Virgil/Virgolo 意大利	UPTUN 项目	2005	1	高压	860×10×6.5	30	8～12	—	3	2～3	柴油油池	20
VSH Hagerbach 瑞士	Marioff 公司	2005	10	HI-FOG	200×9.3×2.55	33×2	约 8	—	10	3	小汽车	5～30
San Pedro de Annes 西班牙	Marioff 公司	2006	40	HI-FOG	600×9.5×5.2	24×3	10 或 8（喷头处）	3.7～4.3	较复杂，多数为 5～7	2～3.5	木托盘、高密度聚乙烯托盘	75/90
Runehamar 挪威	SINTEF、Efectis	2007	5	细水雾	1 600×9×6	25×3	—	—	1.5～7	3～4	柴油油池、木托盘	200
San Pedro de Annes 西班牙	SOLIT 项目	2008	50	细水雾	600×9.5×5.2	—	—	—	—	—	木托盘、柴油油池	200
Runehamar 挪威	VID Fire-Kill、SINTEF	2009	—	低压	1 600×9×6	20×3	1	—	—	2～3	柴油油池、木托盘	100
San Pedro de Annes 西班牙	SOLIT2 项目	2011—2012	30	细水雾	600×9.5×5.2	60	—	—	3	2～3	木托盘、柴油油池	5～160

Marioff 公司也在挪威 IF 隧道开展了 24 组高压细水雾灭火试验，火源为油池火或木托盘火，隧道断面为马蹄形。隧道内安装了三行喷头，一行位于隧道中心线上，一行位于顶棚右下侧，还有一行位于一侧的墙上。大多数试验中，喷头间距为 3 m；最后 5 组试验中，喷头间距为 4 m。每次试验均在最前面的两个池子前垂直设置一堵 1.1 m 高的墙，用来模拟隧道堵塞效应。此外，在一些试验中，在油池火上方较短距离内设置一钢板，覆盖油池 75%的区域。在大多数试验中，细水雾系统控制了火势，但并未能扑灭火焰，然而气体温度大幅度降低了。

2005 年，Marioff 公司在瑞士 VSH Hagerbach 隧道开展了 10 组高压细水雾灭火试验，火源为小轿车引起的火灾。该隧道顶棚高度较小，宽约 9 m，高约 2.5 m。模拟的是法国巴黎 A86 客车隧道内两辆或更多辆客车相撞时造成的火灾场景。细水雾灭火系统包括两个 33 m 长的分区，顶棚各安装有三行喷头。通过观察火灾规模，然后手动启动细水雾灭火系统。所有的喷头均为 90°雾化锥喷嘴，工作压力约为 8 MPa，两行喷嘴之间的间距为 2.8 m。试验中，初始纵向风速为 6 m/s，然后在点火后 4 min 内将其降至 3 m/s。试验表明，灭火系统启动后阻止了火焰向邻近交通工具的蔓延。

2006 年，Marioff 公司在西班牙 San Pedro de Annes 试验隧道开展了 11 组高压细水雾灭火试验，旨在评估该公司的 HI-FOG 细水雾灭火系统对高火灾载荷物品（如重载货车）火灾的灭火效能，燃料多数采用木托盘，将其堆放在一个平台上以模拟重载货车。其中 2 个试验采用的木托盘中夹杂着高密度聚乙烯托盘（质量比为 16%）。每个试验中细水雾灭火系统都抑制了火灾发展，使其热释放速率峰值有了一定程度的下降。

2007 年 12 月和 2009 年 1 月，荷兰公共工程部内负责隧道安全的公共工程及水管理总司（Rijkswaterstaat）委托挪威科技工业研究院（SINTEF）和 Efectis 公司在 Runehamar 隧道开展了 5 组大尺寸火灾试验，包括 3 个油池火试验和 2 个木托盘火试验。试验的主要目的是确定细水雾灭火系统对充分发展火灾的抑制和灭火效果，研究火源下游油罐车发生可燃蒸气云爆炸（BLEVE）风险。试验中细水雾灭火系统对火源区域和火源下游区域的降温效果较明显，并且 3 个油池火试验中火焰可被细水雾灭火系统迅速抑制和扑灭，但在 2 个木托盘火试验中，火焰并未被迅速抑制和扑灭，且生成了大量的 CO。试验证明了在系统尽早开启的情况下，细水雾灭火系统具备保护油罐车，使其免于可燃蒸气云爆炸风险的能力。

SOLIT 和 SOLIT2 项目先后于 2008 年和 2011—2012 年在西班牙 San Pedro de Annes 试验隧道开展了 50 组和 30 组细水雾灭火试验，火源为柴油油池火和

木托盘火，部分试验还考虑了火源被部分遮盖的情况。试验中细水雾灭火系统大多有效地控制或抑制了火灾，但部分试验中火灾并没有被控制，仅有气体温度因细水雾灭火系统的气相冷却作用而降低。

上述试验中，火灾往往没有被扑灭，但火势大多控制在一定范围内，并未向其他可燃物蔓延，且气体温度也大多下降明显。

国内随着隧道建设的蓬勃发展，特别是长隧道、特长隧道、超宽隧道工程日益增多，也逐渐开始了隧道实体试验研究，如 2003 年秦岭特长公路隧道火灾试验（模型尺寸）、2006 年昆明—石林高速公路阳宗隧道火灾试验、2007 年南京市龙蟠中路隧道火灾试验，这些试验的目的主要是研究隧道火灾特性、隧道火灾烟气运动特性等，并未涉及固定灭火系统在公路隧道中应用的研究。为验证上海长江隧道防灾系统设计可靠性而开展的全比例火灾试验，则涉及了泡沫-水喷雾自动灭火系统灭火试验，其火源为木垛、油盘、小汽车或面包车引起的火灾，火源热释放速率为 10 MW 或 20 MW，结果表明泡沫-水喷雾联用自动灭火系统能有效扑灭与遏制隧道内可能发生的各类火灾，且越早启动越好，温升低，灭火快。同时该自动灭火系统对流淌的油类火灾作用非常明显，对立体油类火灾有控火、降温的功效，对油类火灾灭火系统启动的最佳时间应为着火后 2 min[4]；对 A 类火灾的灭火效果较差，但能有效控火并使火场温度迅速降低。国家科技支撑计划项目“港珠澳大桥跨海集群工程建设关键技术研究与示范”的子课题“离岸特长沉管隧道防灾减灾关键技术”以港珠澳大桥海底沉管隧道为研究对象，通过开展足尺沉管隧道火灾试验，对泡沫-水喷雾联用灭火系统的灭火、控火效果进行了系统性研究[5]。云南交投集团投资有限公司在云南邱家垭口隧道和芹菜塘 1 号隧道安装了丹麦 VID 公司生产的低压细水雾灭火系统，并开展了全尺寸实体火灾试验，结果表明在隧道通风良好的情况下，低压细水雾灭火系统开启后可有效降低隧道内的环境温度及火源周围的 CO 浓度，确保公路隧道的消防安全和人员逃生安全[6-7]。

以上所述的多数试验都验证了细水雾灭火系统对公路隧道火灾的抑制和控制效果。因此，国外许多国家与国内部分区域已允许在公路隧道内应用细水雾灭火系统，并制定了相应的应用技术导则或标准。欧洲 UPTUN 项目和 SOLIT2 项目[9-10]都发布了隧道固定灭火系统工程设计导则，为包括细水雾灭火系统在内的固定灭火系统在公路隧道内的应用提供了设计指导。美国《公路隧道、桥梁和其他有限制性通道公路标准》（NFPA 502—2014）规定公路隧道允许使用固定灭火系统，包括泡沫-水喷淋灭火系统、水喷雾灭火系统、泡沫-水喷雾灭火系统和细水雾灭火系统，并建议系统在发生火灾后 3 min 内启动以阻止火势增长[11]。世界道路协会（PIARC）发布的报告《公路隧道固定灭火系统：

现状和推荐》（2016R03EN）也推荐在隧道内使用包括细水雾灭火系统在内的固定灭火系统[8]。我国湖南省地方标准《公路隧道消防技术规范》（DB 43/729—2012）提出Ⅰ级隧道应设置泡沫喷淋或细水雾灭火系统，其中规定，细水雾灭火系统的喷雾强度不应小于 3.0 L/（min · m^2），喷雾时间不应小于 60 min[12]。

一些欧洲国家 2005 年后新建的隧道采用了细水雾灭火系统，如图 1-2 和表 1-4 所示，但其安装目的不尽相同，大多为保护隧道结构、隧道内设备和保障生命安全。如英国 Tyne 隧道和西班牙 Calle 30 隧道安装的细水雾灭火系统主要用于保护隧道结构和设备，英国 Dartford 隧道安装的细水雾灭火系统还用于保障生命安全，奥地利 Felbertauern 隧道和 Mona Lisa 隧道则因为通行危险品运输车辆而安装细水雾灭火系统；部分隧道则作为细水雾灭火系统的试点工程，如荷兰 Roertunnel 和 Swalmen 隧道等。这些公路隧道多采用高压细水雾灭火系统，喷雾强度为 0.5～0.8 L/（min ·m^2），隧道火灾设防功率为 30～200 MW，系统多设置 2～3 分区同时启动，每个分区长 24～40 m，喷头安装间距 2～3.6 m，持续喷射时间为 1～5 h。

图 1-2　Mona Lisa 隧道的高压细水雾灭火系统

表 1-4　部分公路隧道细水雾灭火系统应用案例

隧道	隧道长度/m	通风方式	工作压力/MPa	系统类型（厂家）	喷雾强度/[L/（min·m^2）]	分区长度/m	喷头间距/m	动作分区数	持续喷射时间/h	火灾设防标准/MW
奥地利 Felbertauern	5 300	横向	3～4	AQUASYS	0.78	36	2	3	5	200
奥地利 Mona Lisa	800	纵向	3～4	AQUASYS	0.70	40	2	3	2	200
芬兰 Helsinki 服务隧道	2 200	纵向	8	HI-FOG（Marioff）	0.50	25～30	3.5	2	1	20
荷兰 Roertunne	2 015	纵向	3～4	AQUASYS	0.78～0.80	25	2	3	1	200
荷兰 Swalmen	429	纵向	3～4	AQUASYS	0.70～0.72	25	2	3	1	200
西班牙 Calle 30	2 352	半横向	5～14	FOGTEC	0.70	24	3.2	3	1	30
英国 Dartford	1 435	纵向 半横向	4.5（喷头）	FOGTEC	0.73	25	3.57	3	1	—
英国 Tyne-NB	1 650	纵向	5（喷头）	FOGTEC	0.50	25	2.8～3.6	3	—	200
英国 Tyne-SB	1 500	纵向	5（喷头）	FOGTEC	0.50	25	2.8～3.6	3	—	200
丹麦 Nordhavnsvejens	625×2	—	1（喷头）	Tunprotec（VID Fire-kill）	—	25	—	3	—	—

目前，国内公路交通隧道中仅有部分区域应用细水雾灭火系统，如：成都大源商业商务核心区地下环状行车道安装了高压细水雾灭火系统，其目的为消防安全保护；上海长江隧道也安装了高压细水雾灭火系统，但其目的却是对公路隧道实施喷雾降温，以避免因隧道纵向通风区段长、交通负荷高，在炎热季节隧洞内温度过高而带来的行车安全隐患；云南交投集团投资有限公司在云南邱家垭口隧道和芹菜塘1号隧道安装了丹麦VID公司生产的低压细水雾灭火系统，其目的是保障消防安全和确保人员逃生安全。

近年来，国内外相关研究证明了高压细水雾灭火系统或低压细水雾灭火系统应用于交通隧道抑制和控制火灾的有效性。随着社会经济的高速发展，人们环保意识日益增强，以水作为灭火介质的环境友好型细水雾灭火系统在抑火、控火、灭火的同时对人们健康和社会环境伤害小，更适于人员、车辆密集的城市交通隧道安全保护，因此细水雾灭火系统将逐渐受到城市交通隧道建设者和使用者的青睐，成为未来城市交通隧道灭火保护系统的主要选择之一。但细水雾灭火系统在城市交通隧道中的应用仍存在不少问题，具体如下：

（1）细水雾灭火系统的灭火效能受风力等环境气候条件影响较大，目前国内外公路隧道应用的细水雾灭火系统大多采用纯细水雾进行控火、灭火，未考虑细水雾添加剂及注入装置、隧道消火栓的协效作用。

（2）国内对城市交通隧道细水雾灭火技术的研究及应用还较少，尤其是隧道细水雾灭火系统的全尺寸试验研究比较少，缺乏相应的应用技术标准。

本书以细水雾灭火系统为研究对象，立足于：如何高效发挥细水雾灭火系统抑火、控火的作用，并提高系统的灭火性能；如何促使细水雾灭火系统功能化、人性化，在保证城市交通隧道安全保护作用的同时更加节能、高效，并结合细水雾灭火系统及交通隧道特点研制了城市交通隧道用细水雾添加剂、多功能高压水雾喷射装置、高压细水雾消火栓等一系列细水雾灭火系统的产品；通过隧道全尺寸试验深入考察细水雾灭火系统对隧道火灾发展和蔓延的抑制作用及其影响，讨论细水雾添加剂、高压水雾注入装置、隧道消火栓三者于城市交通隧道火灾中的协效作用，并结合隧道火灾扑救特点，开展了压缩空气泡沫灭火试验，提出压缩空气泡沫炮应用于城市交通隧道的主要技术参数，以进一步保障和提高城市交通隧道火灾蔓延高效抑制技术的有效性。