

· 专题一:石油矿业安全领域学科发展(矿业与安全工程) ·

地铁隧道火灾防控全尺寸实验研究进展

钟茂华* 刘畅

清华大学 工程物理系 公共安全研究院,北京 100084

[摘要] 全尺寸实验是验证和优化地铁隧道火灾烟气扩散理论、防排烟设计方法和提升地铁火灾防控能力的重要手段。面向地铁火灾安全的工程需求,本文围绕全尺寸实验设施、全尺寸实验技术与装备、全尺寸实验解决的工程问题和科学问题,对地铁隧道火灾全尺寸实验进展进行了综述。通过分析问题导向下当前实验支撑能力的短板与面临的挑战,评述了全尺寸实验技术与装备的研发与应用进程,凝练了全尺寸实验情景构建能力、测试装备智能化集成化和对标准规范的推动作用等迫切需求,提出了未来地铁隧道火灾全尺寸实验研究的重点突破方向。

[关键词] 地铁;隧道火灾;全尺寸实验;情景构建;技术装备

地铁作为我国城市主要交通基础设施,是维持城市运行、打造多层次立体化交通体系、形成现代化城市交通格局的重要生命线工程。我国地铁建设与运营规模居于世界首位,地铁承载客流量逐年递增,北京、上海和广州常态化运营下的日均客流量已突破千万,尖峰客流凸显。同时,线网密度的提高导致地铁隧道结构更为复杂、线路间联系更为紧密,一旦发生重特大火灾事故,容易造成群死群伤、线网瘫痪的严重后果,火灾风险防控面临前所未有的严峻挑战。

全尺寸实验是检验地铁隧道防灾系统、验证优化地铁隧道防排烟技术、推动地铁隧道火灾防控基础理论提升的重要手段。国家在“十二五”“十三五”时期持续启动了地铁系统火灾防控与全尺寸实验技术的研发、应用研究,目前已在全国30余座城市地铁工程开展了全尺寸实验工作,实现了地铁隧道火灾全尺寸实验技术由起步到跨越的快速发展。“十四五”阶段,我国将依托“城市安全重大事故防控技术支撑基地”建成地铁隧道火灾全尺寸实验设施,聚焦于地铁隧道工程火灾风险防控水平提升的总体目标。在我国城市地铁网络化运营规模持续提升的背景下,解决现有实验能力与地铁发展速度不匹配、防灾支撑能力不足的问题,亟需融合安全科学、火灾科



钟茂华 清华大学工程物理系/公共安全研究院研究员,国家杰出青年科学基金获得者,入选中组部“万人计划”、科技部“创新人才推进计划”等。主要从事地铁安全研究,研制国家或行业标准8项,发表SCI论文20余篇,其中以第一作者和通讯作者发表*Nature*文章1篇。获省部级科技奖励一等奖8项,授权发明专利10余项。主持国家重点研发计划、国家自然科学基金等项目10余项。

学、燃烧学、流体力学等学科提出适用于工程特点的火灾全尺寸实验情景构建理论与方法,同时也是对复杂隧道火灾实体实验大规模分布式测量和集成数据采集能力的综合考验。本文回顾和综述目前国内外地铁工程全尺寸实验设施建设、全尺寸实验技术与装备发展现状,重点评述了工程需求导向下全尺寸实验解决的关键科学问题,提出了未来全尺寸实验重点研究方向和发展趋势。

1 地铁隧道火灾全尺寸实验设施建设现状与趋势

欧洲部分国家^[1]、加拿大^[2]、日本^[3]和韩国^[4]等均建成了隧道全尺寸防灾实验设施,具备构建公路、铁路和地铁火灾与人员疏散等情景的全尺寸实验能力。相比国外的全尺寸实验隧道建设,我国近年来

收稿日期:2021-06-14;修回日期:2021-12-13

* 通信作者,Email:mhzhong@tsinghua.edu.cn

本文受到国家自然科学基金项目(51425404)的资助。

实验隧道规模、实验场景构建和防灾参数监测装备已发展至“并跑”“领跑”阶段,应急管理部四川消防研究所^[5]、中国安全生产科学研究院^[6]、重庆交通科研设计院^[7]等研究机构建设了不同规模的隧道火灾全尺寸实验设施。如图 1 所示,中国安全生产科学研究院全尺寸隧道长度达到 1.3 km,重庆交通科研设计院的全尺寸隧道火灾实验功率达到 40 MW。

当前,我国地铁工程的网络化运营格局愈加显著,相比于铁路、公路等隧道工程,地铁隧道的人员密集程度和大客流运输频次更高。线网运营形成的正线、联络线、辅助线等枢纽结构众多,隧道形式复杂程度、列车运行速度和线网隧道运营安全协同性的提高,地铁设计、建设和运行安全重大需求对隧道火灾全尺寸实验情景构建能力提出了前所未有的要求和挑战。在此形势下,由应急管理部和教育部组织,国家发展和改革委员会资金支持^[8],清华大学在“十三五”期末启动建设了轨道交通事故模拟实验平台,其中实验隧道尺寸为 300 m(长)×5 m(宽)×5.6 m(高),如图 2 所示,具备地铁区间隧道、折返线、联络线和独头巷道等复杂结



图 1 中国安全生产科学研究院建设的全尺寸实验隧道



图 2 清华大学建设的全尺寸地铁实验隧道示意图

构空间火灾全尺寸实验情景构建能力,对于提高我国地铁隧道工程火灾安全实验水平和自主创新能力形成有力支撑。

2 地铁隧道火灾全尺寸实验技术与装备

全尺寸实验对于实际火灾场景的模拟构建能力依赖流体、热力、烟气成分等参数的测量,适用于复杂结构特征、运行场景和火场环境的实验技术与装备是实现地铁隧道全尺寸火灾实验功能的关键手段。国内外已建成的全尺寸隧道实验设施中,实验火灾情景构建和分布式火场参数测量是全尺寸隧道火灾实验的 2 个重要环节。利用特定物化性质的液体和固体燃料构建稳定燃烧火源是全尺寸实验最常用的火灾情景构建技术,例如我国某地铁隧道全尺寸实验的甲醇火灾场景^[9]、瑞典某矿井隧道全尺寸实验的庚烷火灾场景^[10]、荷兰某公路隧道全尺寸实验的庚烷—甲苯混合燃料火灾场景^[11]等,虽然具有成本低、火灾规模稳定且易于控制的优势,但对于实际隧道火灾燃烧烟气成分、火灾功率增长曲线的模拟能力方面仍有差距。为解决这一问题,英国^[12]、加拿大^[13]、瑞典^[14]等国家的研究机构,以及国内中国安全生产科学研究院^[15]、重庆交通大学^[16]和长安大学^[17]等利用整车和车体材料燃烧的全尺寸实验,获取了更为接近实际火灾场景的火灾功率曲线和危险性参数演化过程,为构建隧道火灾全尺寸火灾情景提供了更为可靠的数据支撑。在全尺寸实验测量方面,一般采用火场温度、烟气浓度、能见度、热辐射等物理测量方法表征火灾危险性,实验结果可靠性与传感器精度、时间同步性、测点最优化布置等密切相关。利用以上技术方法,国内外在全尺寸实验设施内开展的隧道火灾研究工作构建了火灾烟气扩散、烟气通风控制等基础理论模型,但受限于实验设施、实验环境条件的单一性,研究结果在地铁隧道火灾防排烟设计、标准制修订的应用范围有限。因此,检验、修正全尺寸实验数据以提高在实际地铁隧道工程的适用性,对于充分发挥现有全尺寸实验设施的作用十分必要,同时是全尺寸地铁实验隧道建设、实验技术发展和火灾防控能力提升面临的共同需求。

随着地铁隧道工程复杂程度不断提高,全尺寸隧道火灾实验设施面临更新、改造等方面的较高成本,国内研究机构逐渐将实验对象由模拟实验设施转移至实体地铁隧道工程,由此对全尺寸实验技术和装备带来新的挑战。一方面,处于建设、运营阶段

的地铁系统处于高效运转状态,有限的实验时间对实验装备的便捷性、机动性要求较高;另一方面,复杂地铁隧道实验区域庞大,全尺寸实验技术必须解决烟气流场、温度场和组分等多样化参数数据同步集成采集的问题;同时,地铁建设、运营过程的大型机电设备对实验系统造成干扰,导致实验系统运行难度增加,数据可靠性降低,亟待发展高效稳定的现场全尺寸实验系统控制技术。为解决这一问题,“十二五”^[18]至“十三五”^[19]时期清华大学、中国安全生产科学研究院研发了集火灾场景构建、实验测量和防灾大数据系统为一体的实验技术、装备与标准^[20],例如地铁车站与隧道火灾全尺寸实验情景构建技术、现场热烟测试装置等,有力支撑了我国地铁隧道火灾全尺寸实验能力的提升。清华大学、中国安全生产科学研究院等^[21]近年来在国内30余座城市的地铁车站和隧道持续开展全尺寸火灾实验,如图3所示,不断对全尺寸火灾实验技术与装备进行发展和完善。

3 地铁隧道火灾全尺寸实验解决的关键科学问题

围绕地铁隧道火灾烟气扩散机理、复杂结构隧道烟气扩散动力学、烟气流动控制等基础理论,隧道火灾全尺寸实验解决的主要科学问题包括以下几方面:

3.1 地铁列车火灾发展与烟气扩散基础规律

地铁列车车体及乘客行李是隧道中的主要火灾载荷,由于列车构成材料复杂,通过单一或若干材料燃烧参数预测整车火灾发展趋势仍缺乏实证依据,



图3 清华大学和中国安全生产科学研究院开展的部分地铁车站和隧道全尺寸实验

而整车火灾发展规律及热释放速率数据是隧道防火设计的关键性参数。在地铁火灾防控需求迫切的形势下,通过实验方法解决列车火灾发展规律认识不清、整车燃烧基础数据不完善的问题,是全尺寸实验能力提升面临的重要挑战。目前列车内部典型火灾载荷全尺寸实验将热释放速率确定在3.5~5 MW^[22-24],且存在较明显的低温烟气沉降问题^[25]。同时,由于列车空间狭小且相对封闭,火灾过程涉及车门开启、车窗爆裂等状况,车内火灾烟气稳态流动的突变条件较多,车体材料更新速度较快,导致烟气扩散过程十分复杂。中国安全生产科学研究院联合北京市地铁运营有限公司开展的地铁整编列车火灾烟气扩散与控制全尺寸实验中^[26],如图4所示,仅在0.17~0.34 MW的火灾功率下,烟气就迅速充满了列车空间,严重威胁列车人员疏散安全。

欧洲部分国家、加拿大等对列车车厢的全尺寸燃烧实验中,单节车厢的热释放速率测试结果为35~77 MW^[13, 14],远高于目前我国地铁隧道列车火灾防排烟设计参数^[27]。我国近年来投运的地铁列车防火等级与性能相比国外有所提高,为获取科学可靠的支撑数据,西南交通大学通过测试实验指出列车侧壁、顶棚等材料的引燃温度为433~520℃,单位面积热释放速率为220~320 kW/m²^[28]。2015年,中国安全生产科学研究院联合北京市地铁运营有限公司和公安部天津消防研究所开展了单节车厢全尺寸燃烧实验^[29],如图5所示,在火灾发展191s时,最大燃烧热释放速率达到11.34 MW,这一实体实验数据为地铁列车防火、防排烟设计提供了重要的科学依据。



图4 列车内部全尺寸火灾实验烟气扩散情况



图 5 地铁列车单节车厢全尺寸燃烧实验



图 6 地铁长大区间隧道全尺寸火灾实验

3.2 地铁区间隧道火灾烟气流动规律与控制理论

目前对于常规地铁区间隧道的烟气流动和控制参数,已经建立了较为实用可靠的理论预测模型^[30, 31]。随着隧道形式和列车制式日新月异的发展,区间隧道全尺寸火灾实验研究的重点正在向复杂边界下非稳态烟气流动与控制转变,例如特长曲线隧道、长大连续倾斜隧道和列车高速运行环境等。解决非一维边界限制、列车多点阻塞、动态活塞风扰动下的烟气控制问题是全尺寸实验面临的新挑战,也是地铁工程火灾安全的现实需求。

我国学者率先开展了地铁区间隧道复杂运行环境下的全尺寸火灾实验研究,史聪灵等在地铁长大区间隧道开展列车阻塞条件下的全尺寸火灾实验,如图 6 所示,建立了烟气温度分布和扩散速度预测模型^[32]。钟茂华等在广州、南昌地铁工程区间隧道通过全尺寸实验,如图 7 所示,揭示了隧道断面、坡度、曲率、车辆阻塞和运行对烟气扩散过程的影响机制^[33, 34]。Weng 等在重庆地铁区间隧道单洞单线向单洞双线的过渡段开展全尺寸火灾实验,获取了隧道断面边界变化条件下的烟气温度、组分浓度和蔓延速度等演化规律^[35]。Kang 等在全尺寸地铁隧道纵向通风条件下开展火灾实验,利用耗氧法测量了柴油池火和木垛火灾的燃烧热释放曲线^[36]。中国安全生产科学研究院在北京、广州、深圳、南京、成都等城市地铁工程中开展了全尺寸火灾实验^[37],对隧道长度、列车阻塞比、风速等条件下的烟气流动控制规律进行了系统研究,为我国地铁工程防灾大数据系统的构建形成了重要的基础数据支撑。

3.3 复杂结构隧道火灾烟流规律与控烟模式

地铁线网密度不断提高的格局下,枢纽区域、配线区域、联络区域和起点区间等隧道结构、连接形式



图 7 列车阻塞下地铁倾斜区间隧道全尺寸火灾实验

的多样化、复杂化对烟气控制提出了更高的要求。复杂结构隧道往往作为线路之间的连接枢纽,气流组织和防火分隔难度增加,火灾影响范围大,进行通风排烟、应急疏散和救援的难度增加。由于单线区间隧道烟气一维流动理论模型很难表征复杂连接隧道的烟气扩散过程,单一纵向控烟模式不适用于多区域协同通风控制,如何对火灾烟流规律进行模型表征,是开展复杂结构地铁隧道全尺寸实验须解决的首要问题,进而才能对混合通风控烟模式不断优化。

从科学问题的层面来看,利用地铁复杂结构隧道全尺寸实验建立烟气扩散模型和控烟模式的难点在于,烟气流动过程受隧道复杂边界和非稳态气流耦合作用。例如,枢纽区域隧道风机、射流风机、顶部排烟道等多种协同模式可导致气流流场结构紊乱,很难避免通风系统运行参数协同性不足导致烟气滞留和沉降现象。由于这一问题随着地铁线网的形成而逐渐凸显,相关标准规范尚未对该类型隧道火灾烟气控制形成具体的技术指导,国内近几年开始开展地铁复杂结构隧道全尺寸火灾实验研究。

2015年以来,清华大学公共安全研究院先后开展了联络隧道^[6]、折返线隧道^[38]、停车线隧道^[39]全尺寸火灾实验,部分实验现场如图8所示,建立了典型复杂结构隧道烟气流动的物理预测模型,解决了常规隧道烟气一维扩散模型难以准确描述复杂结构参数下烟气扩散特征的问题,为防排烟工程设计计算提供了实体实验支撑。2019年,重庆交通科研设计院在具有与地铁联络隧道类似结构的某公路隧道横通道区域开展全尺寸火灾实验,获得了烟气通过联络隧道向临近隧道的扩散规律^[40]。2021年,西南交通大学在具有多个横通道的公路隧道开展全尺寸火灾实验,提出了火源特性与通风条件对烟气最高温度的影响机制^[41]。然而,对于未来复杂结构隧道火灾全尺寸实验而言,随着地铁枢纽建设规模的提高,现场实验规模和实验控制难度将大幅增加,进一步提升大规模现场实验分布式测量和集成采集能力,并加强现场实验环境控制、监测的自动化程度,是地铁复杂结构隧道火灾全尺寸实验面临的迫切需求。



(a) 折返线隧道



(b) 双停车线隧道

图8 地铁典型复杂结构隧道全尺寸火灾实验

4 重点研究方向建议

我国地铁隧道工程建设快速发展进程中,火灾风险防控的新难题和挑战不断凸显,以工程需求和科学问题为导向,火灾全尺寸实验研究的重点突破方向包括以下方面:

(1) 地铁隧道典型火灾载荷燃烧特性与火蔓延预测理论。构建地铁列车、工程车车体材料、电缆等火灾载荷燃烧特性大数据库,提出我国地铁隧道典型火灾载荷燃烧功率发展曲线,建立适用于不同阻燃等级的典型材料燃烧蔓延模型,掌握地铁隧道火灾发展预测方法。

(2) 地铁隧道运行环境火灾全尺寸实验情景构建方法。综合考虑列车运行、人员疏散、通风系统动作、车站与隧道火灾协同应急等真实场景,建立地铁隧道运行系统全情景要素火灾全尺寸实验技术,提出全尺寸实验误差分析与控制方法,掌握接近真实火场环境的全尺寸实验情景构建理论体系。

(3) 非稳态边界/环境作用下全尺寸实验分布式测量与集成采集技术。针对火灾过程中地铁系统动态运行环境,提出适用于列车运行、隧道气流突变、车站与隧道协同动作的火灾动力学参数测试技术,并在电磁场、热力场、高温高湿等多重干扰作用下,实现火灾全尺寸实验多通道数据集成采集。

(4) 地铁大型复杂枢纽隧道工程火灾烟气控制技术。面向地铁枢纽复杂结构隧道火灾防控工程需求,通过火灾全尺寸实验,提炼隧道结构边界和混合通风耦合作用下的烟气流动共性特征,揭示复杂枢纽隧道火灾烟气流动规律,建立跨区段多类型通风方式协同控烟理论,完善地铁复杂隧道工程火灾烟气控制模式的技术标准。

5 结论与展望

5.1 结论

在利用全尺寸实验提高地铁隧道火灾防控能力方面,我国正处于由“并跑”向“领跑”的提升阶段,发展与地铁隧道工程建设规模相匹配的全尺寸实验技术具有必要性和迫切性。围绕全尺寸实验对解决工程问题和科学问题的推动作用,本文对地铁隧道火灾全尺寸实验进展进行了综述,主要涉及以下内容:

(1) 介绍了目前国内外建设的隧道火灾全尺寸实验设施,总结得出问题导向下我国地铁隧道火灾全尺寸实验能力存在的不足与面临的挑战。

(2) 回顾了工程需求背景下,全尺寸实验主体由大型实验设施向地铁工程现场的发展进程,评述了由此推动的全尺寸实验技术与装备的研发与应用创新。

(3) 从工程应用中提炼了全尺寸实验解决的列车火灾发展规模预测、区间隧道烟气流动与控制、复杂结构隧道烟气控制三个方面的科学问题。针对每个科学问题进行了相关进展综述。

5.2 展望

面向地铁火灾安全水平提升的迫切需求,在国家对地铁火灾相关基础和应用研究持续支持下,结合当前地铁隧道火灾全尺寸实验现状,预期发展趋势包括:

(1) 地铁隧道火灾全尺寸实验情景构建能力进一步提高,全面涵盖人员、隧道设施、防灾系统等各情景主体的实验协同。

(2) 地铁隧道火灾全尺寸实验测试手段智能化、集成化程度进一步提升,实现复杂隧道工程、车站和运行列车的分布式物理参数测量、集成采集和数据质量控制。

(3) 全尺寸实验对完善地铁火灾安全标准规范的推动作用更加凸显,立足于全尺寸实验解决的地铁隧道火灾防排烟设计和火灾响应模式等工程问题,通过标准制修订提升地铁隧道工程火灾安全水平。

参 考 文 献

- [1] Lönnemark A, Ingason H. Fire spread and flame length in large-scale tunnel fires. *Fire Technology*, 2006, 42(4): 283—302.
- [2] Liu ZG, Kashef AH, Lougheed GD, et al. Investigation on the performance of fire detection systems for tunnel applications——part 2: full-scale experiments under longitudinal airflow conditions. *Fire Technology*, 2011, 47(1): 191—220.
- [3] Seike M, Kawabata N, Hasegawa M. Experiments of evacuation speed in smoke-filled tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, 53: 61—67.
- [4] Lee DH, Park WH, Hwang J, et al. Full-scale fire test of an intercity train car. *Fire Technology*, 2016, 52(5): 1559—1574.
- [5] 梅秀娟, 高东丽, 王凯红, 等. 防烟空气幕在隧道火灾中的试验研究. *消防科学与技术*, 2019, 38(3): 349—351.
- [6] Liu C, Zhong MH, Shi CL, et al. Temperature profile of fire-induced smoke in node area of a full-scale mine shaft tunnel under natural ventilation. *Applied Thermal Engineering*, 2017, 110: 382—389.
- [7] 蒋树屏, 田堃, 徐湃. 沉管隧道火灾温度场分布规律研究——以港澳大桥沉管隧道为例. *隧道建设(中英文)*, 2018, 38(5): 719—729.
- [8] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 国家发展改革委关于城市安全重大事故防控技术支撑基地建设项目可行性研究报告的批复. (2019-11-25)/[2021-6-4]. https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201911/t20191128_1205480.html?code=&state=123.
- [9] Yang YX, Liu C, Long Z, et al. Full-scale experimental study on fire under vehicle operations in a sloped tunnel. *International Journal of Thermal Sciences*, 2020, 158: 106524.
- [10] Palm A, Kumm M, Ingason H. Full scale firefighting tests in the tistbrottet mine. *Fire Technology*, 2016, 52(5): 1519—1537.
- [11] Lemaire T, Kenyon Y. Large scale fire tests in the second Benelux tunnel. *Fire Technology*, 2006, 42(4): 329—350.
- [12] Carvel RO, Beard AN, Jowitt PW, et al. Variation of heat release rate with forced longitudinal ventilation for vehicle fires in tunnels. *Fire Safety Journal*, 2001, 36(6): 569—596.
- [13] Hurley MJ, Gottuk D, Hall JR Jr, et al. *SFPE handbook of fire protection engineering*. New York, NY: Springer New York, 2016.
- [14] Li YZ, Ingason H. A new methodology of design fires for train carriages based on exponential curve method. *Fire Technology*, 2016, 52(5): 1449—1464.
- [15] Shi CL, Zhong MH, Chen CK, et al. Metro train carriage combustion behaviors—full-scale experiment study. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2020, 104: 103544.
- [16] 徐湃, 蒋树屏, 周健, 等. 沉管隧道火灾热释放速率试验研究. *地下空间与工程学报*, 2016, 12(6): 1516—1523.
- [17] 吴祥超. 汽车轮胎自燃致因和燃烧特性的研究. 西安: 长安大学, 2016.
- [18] 钟茂华, 史聪灵. “十二五”国家科技支撑计划课题“复杂条件下地铁盾构施工事故预防、承压水和试运营风险控制关键技术研究及装置研发”科技报告. 北京: 中国安全生产科学研究院, 2014.
- [19] 史聪灵, 符泰然, 刘波, 等. “十三五”国家重点研发计划课题“城市轨道交通防灾系统检测与风险管控技术最终报告”. 北京: 中国安全生产科学研究院, 2019.
- [20] 国家安全生产监督管理总局. AQ8007-2013, 城市轨道交通试运营前安全评价规范. 北京: 煤炭工业出版社, 2013.
- [21] 钟茂华, 刘畅, 史聪灵. 地铁火灾全尺寸实验研究进展综述. *中国安全科学学报*, 2019, 29(10): 51—63.
- [22] 陈阳寿, 梅秀娟. 地铁列车车厢火灾特性研究. *消防科学与技术*, 2008, 27(6): 399—401.
- [23] 梅秀娟. 地铁车厢纵火模拟试验火灾特性研究. *中国安全生产科学技术*, 2011, 7(3): 10—15.
- [24] Lönnemark A, Ingason H, Li YZ, et al. Fire development in a 1/3 train carriage mock-up. *Fire Safety Journal*, 2017, 91: 432—440.
- [25] Capote JA, Jimenez JA, Alvear D, et al. Assessment of fire behaviour of high-speed trains' interior materials: small-scale and full-scale fire tests. *Fire and Materials*, 2014, 38: 725—743.

- [26] 钟茂华. 国家自然科学基金项目“地铁安全科学与工程”2016 年度报告:附件 4 地铁列车内火灾烟气扩散和沉降全尺寸实验研究报告. 北京: 清华大学, 2016.
- [27] Liu C, Zhong MH, Tian XL, et al. Experimental and numerical study on fire-induced smoke temperature in connected area of metro tunnel under natural ventilation. *International Journal of Thermal Sciences*, 2019, 138: 84–97.
- [28] Bi HQ, Zhou YL, Wang HL, et al. Characteristics of fire in high-speed train carriages. *Journal of Fire Sciences*, 2020, 38(1): 75–95.
- [29] 钟茂华. 国家自然科学基金项目“地铁安全科学与工程”2016 年度报告-附件 3 地铁单列车厢燃烧特性全尺寸实验研究报告. 北京: 清华大学, 2016.
- [30] Hu LH, Huo R, Li YZ, et al. Full-scale burning tests on studying smoke temperature and velocity along a corridor. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2005, 20(3): 223–229.
- [31] Ingason H, Li YZ, Lönnemark A. Tunnel fire ventilation. *Tunnel Fire Dynamics*. New York, NY: Springer New York, 2014: 333–369.
- [32] Shi CL, Li J, Xu X. Full-scale tests on smoke temperature distribution in long-large subway tunnels with longitudinal mechanical ventilation. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2021, 109: 103784.
- [33] 钟茂华, 何理, 肖衍, 等. “十三五”国家重点研发计划课题“城市轨道交通网络化运营重大风险管控与应急救援技术”验收报告. 北京: 清华大学, 2019.
- [34] 钟茂华. 国家自然科学基金项目“列车阻塞条件下地铁单面坡隧道烟流涡旋行为特征研究”成果报告. 北京: 清华大学, 2021.
- [35] Weng MC, Yu LX, Liu F, et al. Full-scale experiment and CFD simulation on smoke movement and smoke control in a metro tunnel with one opening portal. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2014, 42: 96–104.
- [36] Kang N, Qin YP, Han X, et al. Experimental study on heat release rate measurement in tunnel fires. *Fire and Materials*, 2019, 43: 381–392.
- [37] 钟茂华, 史聪灵, 罗燕萍, 等. 复杂地铁火灾烟流控制技术研究的若干进展//第二十届海峡两岸及香港、澳门地区职业安全健康学术研讨会暨中国职业安全健康协会 2012 学术年会论文集, 2012: 381–393.
- [38] Liu C, Zhong MH, Tian XL, et al. Study on emergency ventilation for train fire environment in metro interchange tunnel. *Building and Environment*, 2019, 147: 267–283.
- [39] 钟茂华. 国家自然科学基金项目“列车阻塞条件下地铁单面坡隧道烟流涡旋行为特征研究”2017 年度报告: 附件 2 地铁单洞双线隧道全尺寸火灾实验研究报告. 北京: 清华大学, 2018.
- [40] 曹正卯, 张琦, 陈建忠. 公路隧道车行横通道开启对火灾排烟影响试验. *现代隧道技术*, 2019, 56(S2): 118–125.
- [41] Li ZS, Zhang YC, Guo HW, et al. Experimental Study on the influence of fire source elevation on smoke temperature profile driven by buoyancy in a full-scale mountain tunnel. *Combustion Science and Technology*, 2021, DOI: 10.1080/00102202.2021.1988941.

Progress of Full-scale Experimental Study for Fire Prevention and Control in Metro Tunnel

Zhong Maohua* Liu Chang

Institute of Public Safety Research, Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084

Abstract Full-scale experiment is important to validation and optimization on metro tunnel fire smoke spread theory, smoke control design and fire prevention. Focusing on engineering requirement on metro fire safety, this paper overviews the progress of full scale fire experiment in metro tunnel, concentrating on experimental facility, technology and equipment, engineering and scientific problems. By analyzing the shortage and challenge to experimental ability, development and application process of full scale experimental technology and equipment are reviewed. The urgent need on full scaled experimental scenario construction capability, intelligent and integrated test equipment, and the promote for standards is condensed. Finally, some key future research directions on full scale metro tunnel fire experimental study are suggested.

Keywords metro; tunnel fire; full scale experiment; scenario construction; technology and equipment

(责任编辑 张强)

* Corresponding Author, Email: mhzhong@tsinghua.edu.cn