

2018年度四川省重点出版专项资金补助项目



高速铁路隧道救援站 火灾烟气控制 理论及应用

GAOSU TIELU SUIDAO JIUYUANZHAN
HUOZAI YANQI KONGZHI LILUN JI YINGYONG

朱颖 赵东平 毕海权 编著



西南交通大学出版社

图书在版编目 (C I P) 数据

高速铁路隧道救援站火灾烟气控制理论及应用 / 朱颖, 赵东平, 毕海权编著. —成都: 西南交通大学出版社, 2018.11

ISBN 978-7-5643-6532-5

I. ①高… II. ①朱… ②赵… ③毕… III. ①高速铁路—铁路隧道—火灾—烟气控制 IV. ①U458

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 242198 号

高速铁路隧道救援站
火灾烟气控制理论及应用

朱颖
赵东平
毕海权

编著

责任编辑 姜锡伟
封面设计 何东琳设计工作室

印张 9.25 字数 200千

成品尺寸 170 mm × 230 mm

版次 2018年11月第1版

印次 2018年11月第1次

印刷 成都蜀通印务有限责任公司

书号 ISBN 978-7-5643-6532-5

出版发行 西南交通大学出版社

网址 <http://www.xnjdcbs.com>

地址 四川省成都市二环路北一段111号
西南交通大学创新大厦21楼

邮政编码 610031

发行部电话 028-87600564 028-87600533

定价 66.00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

火灾对于高速铁路安全运行具有重要影响，特别是含救援站的特长铁路隧道，一旦发生火灾，将造成不可估量的损失。因此，隧道火灾条件下的烟气控制及人员安全疏散是高速铁路设计、建设和运营必须解决的关键问题。

本书绪论部分叙述了我国铁路隧道发展情况以及铁路隧道火灾研究现状，对国内外铁路隧道火灾进行了统计，从而分析出铁路隧道火灾的起因和发展特性，同时重点介绍了在隧道火灾疏散中发挥重要作用的铁路隧道救援站，对铁路隧道火灾疏散研究现状进行了归纳。第二章介绍了高速铁路隧道火灾燃烧的基础与燃烧过程中的特殊现象，以及各种可燃物的燃烧过程对列车人员的危害，使读者对高速铁路隧道火灾有一个全面的理解。第三章的重点在于火灾烟气。燃烧过程会产生大量高温有毒的烟气，直接或间接地导致人员伤亡，由于在疏散过程中烟气对人员危害甚至大于燃烧本身，研究烟气流动特性就十分重要了。该章详细介绍了火灾烟气的组成成分及其危害性，基于高速铁路隧道火灾燃烧基础，参考隧道火灾烟气流动扩散原理和相关烟气流动数值计算方法，建立了救援站火灾烟气流动数值计算模型，分析了高速铁路隧道火灾烟气流动特性。第四章则研究了高速铁路隧道救援站烟气流动的控制，首先介绍了救援站常用的排烟方法，再利用仿真模型模拟在静止与继续运行两种状态下，不同的列车停靠位置对于烟气流动的影响。第五章则利用仿真模型研究了隧道各参数对于人员疏散的影响，从而锁定重要的安全疏散影响因素。

全书由朱颖、赵东平、毕海权编著，张开冉、雷毅成统稿。

本书可供科研及工程技术人员应用参考。

编著者

2018年10月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 我国铁路隧道发展概况	1
1.2 铁路隧道火灾	2
1.3 铁路隧道火灾疏散救援	4
1.4 铁路隧道救援站	5
1.5 铁路隧道火灾研究现状	9
1.6 本书主要内容	16
第 2 章 高速铁路隧道火灾燃烧基础	17
2.1 火灾燃烧基础	17
2.2 隧道火灾燃烧的特殊现象	21
2.3 铁路隧道可燃物及其危害特性	27
第 3 章 高速铁路隧道救援站烟气流动与计算	33
3.1 隧道火灾烟气性质	33
3.2 隧道火灾烟气流动扩散原理	38
3.3 救援站火灾烟气流动数值计算方法	42
3.4 救援站火灾烟气流动数值计算软件	48
3.5 救援站火灾烟气流动数值计算模型	49
第 4 章 高速铁路隧道救援站烟气流动与控制	63
4.1 救援站火灾烟气控制方法	63

4.2	列车静止救援站火灾烟气控制计算结果	66
4.3	着火列车继续运行对烟气分布的影响	83
第 5 章	高速铁路隧道救援站人员安全疏散	101
5.1	救援站人员疏散策略	101
5.2	安全疏散准则及判定指标	101
5.3	人员疏散数值模拟方法	104
5.4	安全疏散影响因素	109
参考文献	135

第 1 章 绪 论

1.1 我国铁路隧道发展概况

高速铁路建设起于 1964 年。自日本建成时速 210 km 的东海道新干线以来，世界客运铁路开始向高速化发展。近些年，日本新干线、法国 TGV、德国 ICE 和意大利 ETR 是世界高速铁路发展的先锋，法国 TGV 于 2007 年 4 次创下了 574.8 km/h 的世界最高速度试验记录。

我国高速铁路起步较晚，但发展迅速，其发展过程可以划分成两个阶段：第一阶段，1990 年至 2007 年，这一阶段经历了全国铁路五次大提速，并完成了对德、日、法高速动车组技术的引进、消化和吸收；第二阶段，2008 年至今，以“中国高速列车自主创新联合行动计划”的启动实施为契机，标志着高速铁路产业进入自主创新的阶段。2008 年 8 月 1 日我国第一条时速 350 km 的京津城际高速铁路开通运营，标志着我国正式进入高速铁路时代。我国先后规划了“四纵四横”的客运专线和三大区域的城际快速客运系统，贯通了哈尔滨至北京至香港（澳门）、连云港至乌鲁木齐、上海至昆明、广州至昆明高速铁路通道，规划了北京至台北、呼和浩特至南宁、北京至昆明、宁夏银川至海口、青岛至银川、兰州至广州、北京至兰州、重庆至厦门等高速铁路通道，拓展了区域连接线。目前，我国高速铁路营业里程达到 3 万千米，覆盖了 80% 以上的大城市。

我国是一个多山的国家，山区面积约占全国总面积的 2/3，随着铁路建设的开展，铁路隧道的建设也大规模展开。截至 2017 年年底，中国已投入运营的特长铁路隧道共 132 座，总长度为

1 812 km。其中，长度在 20 km 以上的特长隧道 9 座，累计长度 219 km^[1]。预计到 2020 年，我国建成的铁路隧道总长度将达到 20 000 km，长度超过 10 km 的特长铁路隧道总数量将超过 200 座，总长度将超过 3 000 km^[2]。

1.2 铁路隧道火灾

长大铁路隧道在运营过程中，其安全性备受关注，尤以火灾问题最为常见与突出。隧道火灾危害严重、救援困难、社会影响大，因此，预防控制火灾，保证铁路隧道稳定、安全地运行是整个铁路交通系统运行的重要环节。

1.2.1 铁路隧道火灾起因

铁路隧道火灾起因主要包括以下两个方面：

- (1) 旅客列车在隧道中的各种意外着火事故。
- (2) 货物列车和油罐列车在隧道内发生的火灾。

这两方面中以旅客列车在隧道中的各种意外着火事故对旅客生命财产安全产生的危害最大，也是近些年国家关注的焦点。表 1-1 为国内外铁路隧道发生火灾的统计情况^[3]。

表 1-1 国内外铁路隧道火灾统计情况

发生时间	隧道名称	事故伤亡情况/人	事故原因	消防救援方式
1972 年 11 月	日本北陆隧道	伤 714，死 30	餐车电采暖接线不良，前后车厢与着火餐车连接致使火灾蔓延	前后车厢与着火餐车分离，切断电源
1976 年 3 月	我国丰沙线旧窝庄东 46#隧道	无	线路水平超限，列车脱轨摩擦起火	甩掉着火车，在洞外控制火势，减少事故伤亡

续表

发生时间	隧道名称	事故伤亡情况/人	事故原因	消防救援方式
1976年10月	我国宝成线白水江140#隧道	死75, 重伤8	超速制动过猛, 油管破裂起火燃烧	沙袋封堵、洞口注水
1987年8月	我国陇海线兰州十里山2#隧道	死2, 直接经济损失117万元人民币	线路与钢轨断裂, 脱轨后撞击起火	定向爆破23万立方米, 封闭洞口注水28万立方米
1987年11月	美国斯普罗乌尔隧道	直接损失25.5万元人民币	附近燃烧的树叶被列车风卷进隧道引燃隧道护板	用土封堵隧道两洞口, 并注水16万立方米
1990年7月	我国湘渝线梨子园隧道	死4, 伤14	接触网悬挂点绝缘子表面放电引燃汽油团爆炸	平板车架沙袋封堵洞口, 并注水16万立方米
1991年7月	我国京广线大瑶山隧道	死12, 伤20	17#车旅客吸烟起火	列车自带灭火器救火
1992年9月	我国青藏线岳家村18#隧道	直接损失132.6万元人民币	雨后路基不均匀下沉, 列车脱轨撞击起火	平板车加沙袋封堵洞口, 注水
1993年6月	我国西延线蔺家川隧道	死8, 伤10	减速制动摩擦产生火星引燃外溢原油, 油气爆炸	沙袋封堵洞口, 注水
2000年11月	奥地利基茨施坦霍恩山隧道	死155, 伤18	列车电暖空调过热, 使保护装置失灵	自然灭火
2015年12月	日本北海道隧道	无	电线短路	—

1.2.2 铁路隧道火灾特点

铁路隧道结构形式(狭长受限空间)以及空间位置(多处于山区、地下或水下)等的特殊性, 使得其发生火灾时极易造成人员伤亡。隧道火灾的主要特点如下:

(1) 产生大量有毒有害烟气。

火灾产生的有毒有害烟气是造成火灾中人员伤亡的主要原因^[4]。旅客列车内部通常由复杂的可燃材料组成, 列车车厢内部的装饰含有大量的塑料、橡胶、布料以及乘客行李等可燃材料, 加之铁

路隧道是空间狭长的受限空间，隧道内空气供给不足，因此隧道起火时会造成可燃物严重地不充分燃烧，从而产生高温有毒烟气，造成人员伤亡。

(2) 持续释放的高温烟气不易排放。

受隧道几何结构的影响，火灾产生的热量不易排除，热量积累导致隧道内烟气温度持续升高，尤其近火源场附近，一般3~5 min可使隧道内的温度升至1000℃，这不仅对受灾人员生命安全产生伤害，还可能对隧道结构的稳定性和完整性构成严重的威胁。

(3) 人员疏散困难。

大多数隧道除两个端部出口之外无其他出口，一些特长隧道在内部设置有救援站或避难所，虽然在一定程度上保证了人员疏散的安全性，但火灾燃烧时如通风不畅，也易造成隧道内供氧不足；伴随燃烧产生的大量高温有毒有害烟气，在浮升力作用下沿隧道传播，影响人员疏散安全。同时，大量烟气会降低隧道内的能见度，不利于人观察火势及逃生路径，易使受灾人员摔倒、产生恐慌心理。

(4) 火灾报警及救援难度大。

隧道内列车发生火灾时，列车通常处于运动状态，着火列车继续运动使得隧道内报警装置不易探测到高温烟气，给火灾的探测与预警工作带来了挑战。当隧道内的火势快速发展时，还可能会导致通信设施失效，延误烟雾报警时间。同时，隧道内空间狭小，不宜开展救援，不能保证在有效时间内投入最大的人力物力进行救援，从而失去灭火和救援的最佳时机。

1.3 铁路隧道火灾疏散救援

高速铁路隧道救援是指在紧急情况下确保人员安全疏散而进行的工作。隧道内发生火灾后，救援人员必须尽快疏散旅客，最大限度地减轻损失。

我国《铁路隧道防灾疏散救援工程设计规范》(TB 10020—2017)^[5]中规定:列车在隧道内发生火灾时,应控制列车驶出隧道进行疏散;当列车不能驶出隧道时,应控制列车停靠在紧急救援站进行疏散和救援。具体疏散逻辑流程如图 1-1 所示。

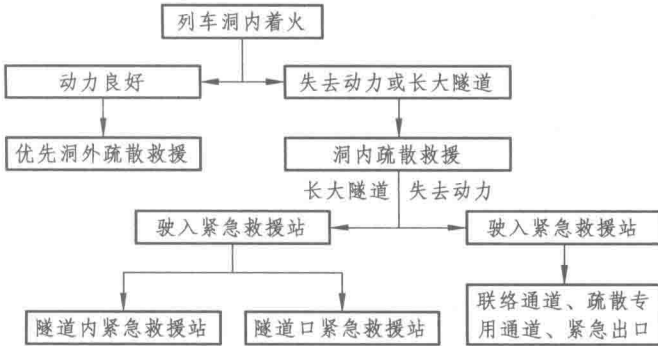


图 1-1 铁路隧道火灾疏散逻辑流程图

1.4 铁路隧道救援站

救援站是设置在特长隧道内、在发生列车灾害事故的情况下能将人员快速疏散到安全区域并能自救或通过救援到达洞外的站点。救援站按布置位置可分为隧道内救援站、隧道口救援站两类。隧道内救援站是设置在隧道内部,供火灾列车停靠,能够满足人员从火灾列车疏散到安全区域且能救援到隧道外的站点;隧道口救援站是设置在隧道群明线及洞口段,供火灾列车停靠,能够满足人员从火灾列车疏散到安全区域的站点^[6]。

多项研究表明,在特长铁路隧道内设置救援站可以极大地降低列车在特长铁路隧道内发生火灾后的危险,提高人员疏散安全^[7]。

1.4.1 救援站主要结构形式

目前,特长铁路隧道内救援站主要有内侧式和外侧式两种结构形式^[8]。

1.4.1.1 内侧式救援站

内侧式救援站一般用于双洞单线隧道，两条隧道互为救援隧道，站台设置在靠近另一隧道一侧，当其中一条隧道内有列车着火时，另一隧道即为救援隧道，如图 1-2 所示。双线特长隧道平面设计中，宜采用双洞单线方案。当事故列车在救援站内停稳后，车厢内人员离车后，通过站台进入横通道到达另一条隧道的站台上，等待救援，或待在避难硐室内等待救援。

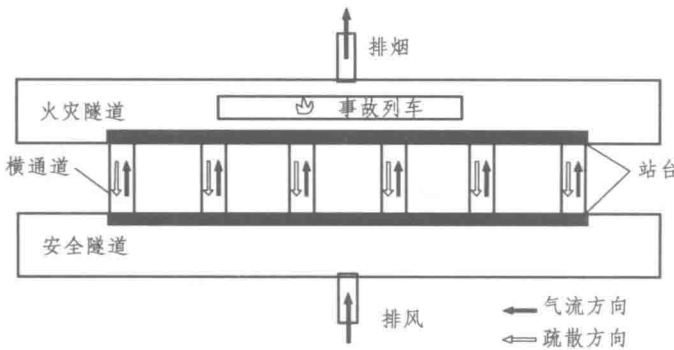


图 1-2 内侧式救援站

1.4.1.2 外侧式救援站

外侧式救援站既可用于双洞单线隧道也可用于单洞双线隧道，是指将站台设置于两线路外侧，然后在站台外侧分别设置人员疏散通道和救援隧道的设置方式，如图 1-3 所示。当事故列车在救援站内停稳后，车厢内人员离车后，通过站台进入疏散通道到达救援隧道，等待救援。

两种形式的救援站都能达到控制火灾烟气、疏散人员的目的，区别在于：内侧式救援站结构紧凑、经济适用，但因两条隧道互为救援通道，一旦发生险情两条隧道都受影响而无法正常运转；而外侧式救援站功能更加齐全，两隧道各有救援通道，互不影响，但需更多投资。两种站台形式在通风方案上的区别主要在于横通道内风速的产生方式，主隧道的通风方式是相同的。究竟采用哪一种形式的救援站更合理，需要根据具体隧道形式、周围环境、

土建费用、救援方案等因素经过深入研究、详细技术和经济对比后才能确定。

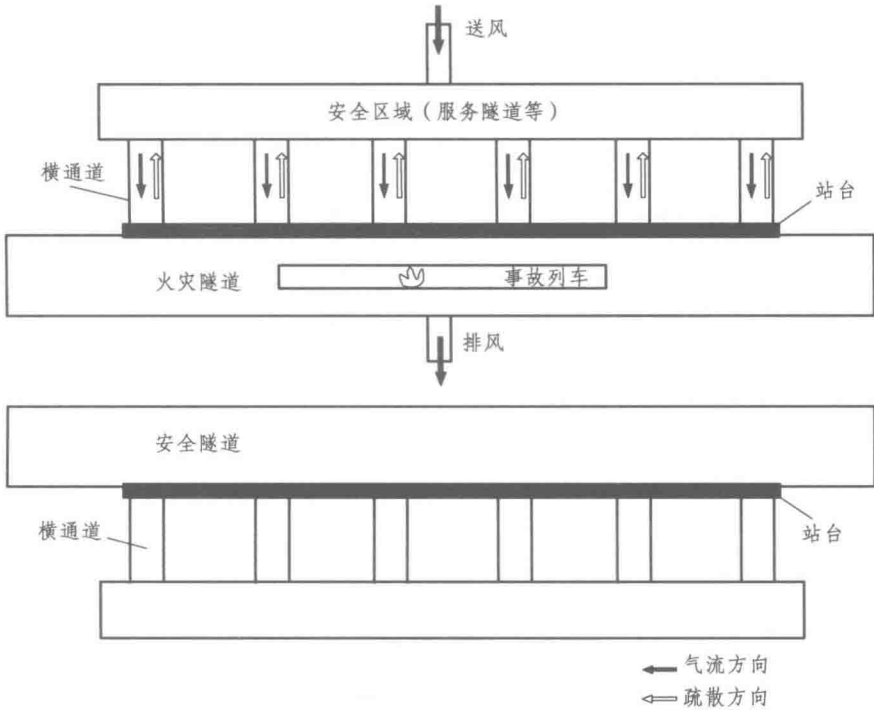


图 1-3 外側式救援站

1.4.2 横通道形式

紧急救援站横通道的形式主要有两种：

- (1) 横通道中设计有避难室，如图 1-4 所示。
- (2) 横通道中未设计避难室，如图 1-5 所示。

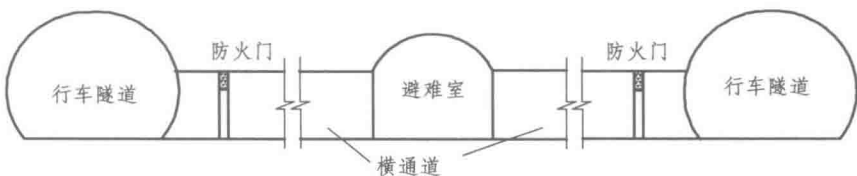


图 1-4 设计有避难室的横通道

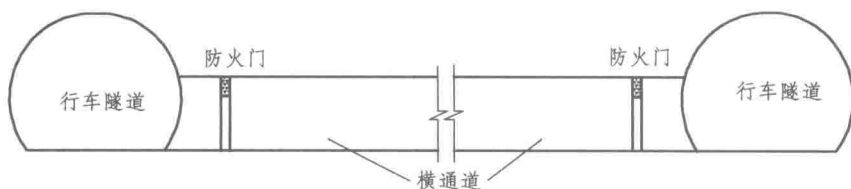


图 1-5 无避难室的横通道

1.4.3 设备设施

救援站设置与主隧道平行的人员避难通道，主隧道和人员避难通道间每隔一定距离设置疏散通道，方便人员撤离；在救援站内设报警、紧急供电和照明设施以及引导乘客避难、救援、灭火、通风排烟等设施。

1.4.4 设计原则

紧急救援站作为隧道内紧急状况下人员疏散和救援的特殊结构，一般要满足以下基本要求：

- (1) 安全的疏散通道及明显的疏散指示。
- (2) 安全的等待区域。此区域内应能容纳足够的逃生人员。
- (3) 设有应急通信报警设备、照明设备、洗手间等基础设施。
- (4) 完善的通风排烟系统。
- (5) 完善的救援方案。

同时，我国《铁路隧道防灾疏散救援工程设计规范》(TB 10020—2017)对隧道内紧急救援站的以下设计内容进行了规定：

- (1) 紧急救援站的位置、形式及规模。
- (2) 紧急救援站站台长度、宽度、高度等。
- (3) 横通道间距、尺寸。
- (4) 横通道门的类型，通行净宽、净高。
- (5) 等待区域位置及尺寸。

(6) 防灾通风、供电、应急照明、应急通信、消防、监控及标识等配套设施。

1.5 铁路隧道火灾研究现状

1.5.1 隧道火灾研究方法

目前,隧道火灾的研究方法主要包括理论分析、试验研究及数值计算。

1.5.1.1 理论分析

理论分析是基于质量、能量和动量守恒,并结合无量纲分析、羽流发展模型、烟气扩散理论等,建立可用于描述隧道火灾烟气流动及控制的理论计算模型,分析隧道内烟气流动特征。

1.5.1.2 试验研究

隧道火灾试验研究可分为全尺寸燃烧试验、小尺寸燃烧试验和介质类比试验^[9-11]。

(1) 全尺寸燃烧试验。

此类试验是在真实建造的隧道中开展火灾试验,试验结果真实可靠。但全尺寸隧道火灾试验需要投入大量的人力、物力、财力,试验费用大、周期长,试验的测量系统和测量方法复杂^[12]。中国科学技术大学胡隆华^[13]通过全尺寸试验,获取了大量可靠的数据,完善了隧道火灾相关理论。

(2) 小尺寸燃烧试验。

小尺寸燃烧试验也称缩尺寸燃烧试验,是基于相似准则在缩尺隧道模型中进行的燃烧火灾试验。小尺寸燃烧试验可以较好地反映实际隧道中的火灾场景,能够真实地模拟实际隧道火灾时的温度场和浮力流动特性。与全尺寸火灾试验相比,小尺寸燃烧试

验周期短、代价低，还可以方便地调整试验参数以研究烟气流动的一般规律，而且不受室外气象环境的影响。目前，大部分隧道火灾试验研究都是采用小尺寸燃烧试验开展和完成的^[14-16]。

(3) 介质类比试验。

介质类比试验包括水混合物试验和冷烟气试验。

水混合物试验可分为盐水试验和乙醇水试验，其原理是将火灾的温度差引起的烟气与隧道外空气的密度差用盐水或乙醇水与水的密度差代替，从而通过模拟盐水或乙醇水在清水中的流动来模拟火灾的烟气扩散规律。此方法过程直观、可重复性好、花费较低，但缩尺盐水试验误差较大、理论基础还不够完善，同时它忽略了高温火焰辐射效应和壁面传热。最重要的是由于盐水和乙醇水的密度有限制，能模拟的火灾烟气密差异仅为 0.8~1，故只能模拟小型火灾，不适用于隧道内大型火灾的研究^[17]。

冷烟气试验主要分为氦空气混合物和氦氮混合物在常温情况下试验，试验原理是用氦空气或氦氮混合物与空气之间的密度差代替隧道火灾烟气与空气之间的密度差而形成的空气流动特性，通过不同混合比例模拟不同的火灾规模。冷烟气试验模拟存在以下几个问题：

- ① 忽略了烟气辐射效应和壁面传热现象；
- ② 未考虑火源燃烧卷吸的羽流现象；

③ 相应位置的火源温度及烟气污染物浓度无法确定。故对隧道内的大型火灾的研究，冷烟气试验具有局限性。

1.5.1.3 数值计算

随着计算机硬件和软件的发展以及数值计算方法的日趋成熟，基于流动与传热理论的商用 CFD 软件得到了越来越广泛的应用。科研人员可以通过数值模拟技术进行科学研究，这使得研究人员从编制繁杂、重复性的程序中解放出来，有更多的精力投入到考虑计算的流动问题的物理本质、模型的简化、边界条件和计算结果的合理解释等重要方面。

一般 CFD 数值模拟软件包含前处理、计算和生成数据结果及后处理三个部分。前处理包括建模、生成网格、设置边界条件等；计算过程是由 CFD 软件的核心解算器根据具体的模型，完成相应的计算任务，并生成结果数据；后处理是将生成的结果数据以直观可视的图形形式表现出来。目前，常用的可用于火灾模拟计算的 CFD 软件有 FDS、FLUENT、STAR-CD、PHOENICS、CFX、FLOW^{3D} 等。

1.5.2 隧道火灾研究现状

目前，国内外关于隧道火灾的研究主要集中在火灾通风、烟气特性及控制和数值计算方法等 3 个方面。

1.5.2.1 隧道火灾通风

隧道火灾通风研究主要包括临界风速、回流长度和限制风速等方面。Thomas^[18,19]是最早研究纵向通风临界风速的学者之一，他提出烟气流动特征取决于 Froude 数，他认为当 Froude 数等于 1 时，浮力与流动惯性力相当，此时烟气无回流。Danziger 和 Kennedy^[20]依据 Thomas 理论与试验数据确定 Froude 数为 4.5。Bettis^[21,22]依据一项大尺寸隧道火灾试验研究发现，在低火灾强度下，隧道临界风速与火灾强度成 1/3 次方关系，但当火灾强度很大时，隧道临界风速在很大范围内几乎与火灾强度无关。Oka 和 Atkinson^[23]以缩尺比例隧道模型进行试验，通过研究表明在热释放速率一定的情况下，临界风速为定值，与火源强度无关。Wu 和 Bakar^[24]对不同截面的隧道进行了试验，将隧道水力直径作为特征尺寸，并将热释放速率和临界风速无量纲化处理后，得到不同隧道尺寸临界风速的结果可近似用一简单的公式表达。胡隆华^[13]通过开展全尺寸试验，完善了隧道火灾抑制烟气逆流的临界风速等研究。陈霖^[25]通过引入列车阻塞以及疏散门开启因素的影响，提出了可应用于地铁隧道防排烟系统设计的临界风速模型。

在回流长度和限制风速方面,周延^[26]在一个长 9 m,断面尺寸为 30 cm×30 cm 的巷道中模拟火灾试验,拟合结果表明无量纲回流长度随火源放热率与巷道风速的比值增大近似成指数规律增大。Cordier^[27]采用数值模拟方法研究隧道火灾回流长度,结果表明:回流长度与 Richardson 数成 0.3 次方关系。周庆等^[28]通过 FDS 数值模拟和缩尺寸模型试验分析,得出在统一坡度下,纵向通风速率与回流长度近似成线性关系,当坡度为零时,抑制烟气回流所需临界风速较大。李颖臻^[29]对纵向通风隧道内临界风速与回流长度进行量纲分析,得到临界风速与回流长度的计算公式:当火灾热释放速率较小时,两者均与热释放速率相关;当火灾热释放速率较大时,两者基本与火灾热释放速率无关。

1.5.2.2 隧道火灾烟气特性及控制

Drysdale 等^[30]针对伦敦金十字地铁火灾建立 1:1 模型,结果表明沟槽效应产生的火焰加速蔓延现象是造成金十字地铁火灾伤亡惨重的重要原因;赵明桥^[31]采用 FDS 对区间隧道既有火灾烟气控制规律进行研究,在隧道内采用纵向通风(2 m/s)控制列车中部火灾烟气时,无法保证下风侧乘客疏散安全;李湘蕾^[32]应用 STAR-CD 软件模拟地铁列车顶部着火继续运动的情况,分析运行速度与烟气流动特征及温度分布,提出着火列车在隧道内继续运行的速度为 40 km/h;吴显超^[33]使用 ANSYS CFX 软件研究地铁隧道中的活塞风,用 STEPS 软件模拟火灾时人员疏散情况,通过分析得到活塞风对烟气蔓延和纵向排烟系统有显著的影响^[33]。

1.5.2.3 隧道火灾数值计算方法

Woodburn 等^[34,35]采用 FLOW^{3D} 模拟英国巴克斯顿隧道纵向通风下的火灾工况,并与隧道内的火灾试验测量数据作了对比分析,研究分为火源附近区域和火源下游区域两部分考虑,在火源附近区域,测量结果对采用的湍流模型以及燃料的热释放速率等影响因素十分敏感,在火源下游区域则是采用的湍流模型以及下