

隧道火灾动力学与 防治技术基础

FUNDAMENTALS OF
TUNNEL FIRE DYNAMICS
AND
PREVENTION TECHNOLOGY

胡隆华 彭伟 杨瑞新 著



科学出版社

014039702

U45
15

隧道火灾动力学与 防治技术基础

Fundamentals of Tunnel Fire Dynamics and
Prevention Technology

胡隆华 彭 伟 杨瑞新 著



科学出版社

北 京



北航

C1727651

U45
15

505080310

内 容 简 介

本书以火灾在隧道内发生、发展的理论为基础,从理论模型、数值方法和实验方法上对隧道火灾动力学行为特点进行阐述,并介绍烟气控制技术优化、人员疏散策略与分析评价等关键技术。

本书可供从事隧道火灾科研、消防监督安全管理、防火设计的技术人员参考,也可作为高等院校安全科学与工程专业学生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

隧道火灾动力学与防治技术基础 = Fundamentals of Tunnel Fire Dynamics and Prevention Technology / 胡隆华, 彭伟, 杨瑞新著. —北京: 科学出版社, 2014. 4

ISBN 978-7-03-040288-2

I. ①隧… II. ①胡… ②彭… ③杨… III. ①隧道-火灾-动力学-研究 ②隧道-防火-研究 IV. ①U458

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 053028 号

责任编辑: 牛宇锋 高慧元 / 责任校对: 刘亚琦
责任印制: 张 倩 / 封面设计: 蓝正设计

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 4 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2014 年 4 月第一次印刷 印张: 18 1/2

字数: 362 000

定价: 105.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

近年来,随着我国社会的进步和交通工程事业的迅速发展,各式各样的城市公路交通隧道、地铁隧道、高速公路隧道、铁路隧道迅速涌现。隧道给人们的生活和交通出行带来了许多方便,但也为消防安全带来了一系列突出的问题。隧道的特殊结构形式和复杂气流边界条件,使其在消防设计方面遇到一系列现有规范没有解决的难题,常规建筑的室内消防技术也难以有效发挥作用。因此,亟须隧道火灾动力学与防治技术的科学基础理论的支撑。

中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室面向国家对隧道火灾防治的重大需求,近十年来,承担了包括 973 计划、国家自然科学基金重点及面上项目、国家“十五”、“十一五”、“十二五”科技支撑计划等一批国家及省部级重要科研项目,对隧道、地铁、交通枢纽的火灾防治进行了专项研究。本书作者作为负责人或研究骨干,参与了这些项目的研究工作,取得了一批创新性的科研成果。

本书主要基于作者近十年来的科研成果撰写而成,并适当吸纳了国内外其他与隧道火灾相关的基础知识。全书以隧道火灾动力学行为特点及其防治关键技术为主线,系统讨论火灾在隧道内发生、发展的基础理论,在结构安排上注重理论分析和实验研究、数值计算相结合。本书首先深入讨论隧道火灾的燃烧与烟气蔓延动力学特点与基础理论,在此基础上,介绍针对隧道火灾研究的数值计算与实验模拟方法,并讨论烟气控制技术优化、人员疏散策略与分析评价等关键技术,可为隧道的防火设计及安全管理提供科技支撑和参考。胡隆华拟定了全书大纲,并撰写第1~4章和第6章,彭伟主要撰写第5章,杨瑞新主要撰写第7章。另外,作者所在团队已毕业的阳东博士、蒋亚强硕士、刘帅硕士等,在毕业前一直与作者共同研究。作者与他们完成的学术论文等一系列科研成果是本书的重要素材。本书的一些具体文字、图、表等格式的完善工作得到了作者指导的研究生陈龙飞、唐伟、张阳树、邱曾维、胡郡郡等的大力协助。在本书的撰写过程中,还得到了作者的导师霍然教授,以及范维澄院士、王清安教授等的大力支持,在此深表感谢!

本书的研究工作得到国家重点基础研究发展计划(973)(2012CB719702)、国家自然科学基金项目(51176180)和中央高校基本科研业务费专项的支持,特此致谢!

本书主要供从事隧道火灾科研、消防监督安全管理、防火设计等的人员使用,也可作为高等院校安全科学与工程专业学生的参考书。

由于作者水平所限,书中难免会有疏漏之处,恳请广大读者批评指正。

作 者

2013 年 12 月

中国科学技术大学

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 隧道及其主要类型	1
1.1.1 隧道的分类	1
1.1.2 隧道的发展	4
1.2 隧道的结构特点	5
1.3 隧道火灾的典型案例分析	8
1.4 隧道火灾的基本特点及防治技术难点	11
1.4.1 隧道火灾的基本特点	11
1.4.2 隧道火灾的防治技术难点	16
1.5 隧道火灾的研究现状	17
1.5.1 国外研究现状	17
1.5.2 国内研究现状	19
1.6 本书主要内容	22
参考文献	23
第 2 章 隧道火灾的燃烧行为特征	30
2.1 隧道火灾发展的基本过程	30
2.1.1 受限空间火灾发展的一般过程	30
2.1.2 隧道火灾发展的基本过程及特点	32
2.2 隧道火灾的燃烧特点及热释放速率	32
2.2.1 隧道火灾的主要可燃物	32
2.2.2 隧道火灾的燃烧特点	33
2.2.3 纵向风对隧道火灾燃烧热释放速率的影响	34
2.2.4 纵向风作用下隧道内的火焰贴地行为	48
2.3 隧道内纵向风作用下的火羽流行为	53
2.3.1 火羽流的基本理论、特征参数及隧道火羽流的特点	53
2.3.2 隧道内纵向风作用下的火焰倾角	58
2.3.3 隧道内纵向风作用下的火焰长度	62
2.3.4 隧道内火羽流撞击拱顶区的最高温度	64

2.3.5 纵向风对近火源区温升及感温型火灾自动报警系统的影响	70
2.4 隧道内的火蔓延机制	72
参考文献	73
第3章 隧道火灾的烟气流动与输运行为	76
3.1 隧道火灾烟气蔓延的基本过程	76
3.2 隧道火灾顶棚射流特征	77
3.2.1 隧道火灾顶棚射流的基本形态	77
3.2.2 隧道火灾顶棚射流温度分布	77
3.2.3 坡度对隧道火灾顶棚射流温度分布的影响	82
3.2.4 隧道火灾顶棚射流的水平蔓延速度	85
3.3 隧道火灾烟气层的一维温度场分布	87
3.4 隧道火灾烟气分层及稳定性	93
3.4.1 热浮力分层流稳定性的无量纲表征	93
3.4.2 纵向风作用下隧道火灾烟气分层形态及失稳临界判据	94
3.5 隧道火灾 CO 的输运与空间分布特性	98
3.5.1 隧道火灾烟气层 CO 输运的时间效应	99
3.5.2 隧道火灾烟气层 CO 浓度的竖直分布及其与温度分布的相似性	102
3.5.3 隧道火灾烟气层 CO 浓度的纵向衰减及其与温度衰减的差异表征	106
3.5.4 隧道内利用空气幕抑制 CO 输运的有效性	115
参考文献	118
第4章 隧道火灾的计算机模拟	122
4.1 火灾过程计算机模拟概述	122
4.2 隧道火灾的区域模拟	124
4.2.1 多单元区域模拟	124
4.2.2 多层区域模拟	129
4.3 隧道火灾的计算流体动力学模拟	130
4.3.1 计算流体动力学模拟的基础知识	130
4.3.2 FDS 模拟程序介绍	134
4.3.3 FDS 应用于隧道火灾烟气流动模拟计算的举例	143
参考文献	153
第5章 隧道火灾的实验研究	156
5.1 隧道火灾的实验研究概述	156
5.2 隧道火灾的模型试验	159
5.2.1 相似准则	159

5.2.2 典型隧道试验模型简介	162
5.3 隧道火灾的全尺寸现场试验	166
5.3.1 边界条件	166
5.3.2 热释放速率的测量方法	167
5.3.3 烟气温度分布及烟气前锋、烟气层高度的测量	171
5.3.4 纵向风速的测量方法	175
5.3.5 CO 浓度空间分布的测量	176
5.3.6 隧道火灾烟气蔓延特性的典型全尺寸现场试验	178
5.3.7 隧道火灾自动报警系统性能的典型全尺寸现场测试试验	189
参考文献	196
第 6 章 隧道火灾的通风与排烟技术	199
6.1 隧道的通风排烟设计模式简介	199
6.1.1 全横向通风与排烟	199
6.1.2 半横向通风与排烟	199
6.1.3 射流风机纵向通风与排烟	200
6.1.4 不同通风排烟模式的发展历程及优缺点	203
6.2 纵向排烟作用下隧道火灾的烟流行为及临界风速	204
6.2.1 射流风机作用下的隧道流场特性	204
6.2.2 纵向排烟作用下弧顶隧道内近壁面火灾的螺旋式烟流行为	207
6.2.3 纵向排烟作用下隧道火灾的烟气逆流及临界风速	210
6.3 某主辅双洞隧道火灾烟气控制模式对比分析	230
6.3.1 隧道工程概况及待选烟气控制方案	230
6.3.2 计算机建模及火灾场景设计	231
6.3.3 不同烟气控制方案下的烟气蔓延情况	234
6.3.4 不同烟气控制方案的效果对比	237
6.4 全横向排烟系统若干技术优化策略	240
6.4.1 补气口位置对隧道横向排烟效果的影响	240
6.4.2 排烟启动时机对隧道横向排烟效果的影响	244
6.4.3 全横向排烟速率对烟气层形态及水平蔓延的影响	246
6.4.4 烟气层“吸穿现象”及其对隧道横向排烟效果的影响	249
参考文献	253
第 7 章 隧道火灾中的人员疏散	256
7.1 隧道内的人员疏散设施	256
7.1.1 疏散通道	256

7.1.2 独立避难间	258
7.1.3 隧道灭火救援通道	258
7.1.4 其他疏散设施	258
7.2 隧道火灾的人员疏散模式及策略	259
7.3 隧道火灾时的人员行为特征	264
7.3.1 火灾时人员的一般行为特征	264
7.3.2 隧道火灾时人员行为的特殊性	266
7.4 隧道火灾人员安全评价方法	268
7.4.1 人员安全疏散评价准则	268
7.4.2 人员安全疏散分析评价软件简介	270
7.5 隧道火灾的人员安全疏散分析举例	272
7.5.1 利用经验公式和 Exodus 软件分析某隧道火灾的人员疏散过程	272
7.5.2 利用 Pathfinder 软件和 Exodus 软件分析某隧道火灾的人员疏散过程 ...	281
参考文献	287

第 1 章 绪 论

1.1 隧道及其主要类型

隧道是人类为了满足自身的发展需要而利用地下空间的一种建筑形式,广义上可定义为埋置在岩体或者土层中狭长而相对封闭的地下工程建筑物,其长度可为宽度的成百甚至上千倍。按照用途,隧道大体可分为交通隧道、市政隧道、矿山隧道、水工隧道和人防隧道等。交通隧道包括公路隧道、铁路隧道、城市地铁隧道及较长的地下人行通道等;市政隧道主要用于敷设电缆、管路等设施的地下管路、道路;矿山隧道(通常称为矿井巷道)是从地表之下向外输送矿产资源的通道,它一般在地下总体上呈网状结构,较一般的交通隧道复杂;水工隧道则是用来引水、排水的地下通道。在本书中,将主要讨论交通隧道,书中提到的“隧道”均指交通隧道。

1.1.1 隧道的分类^[1,2]

交通隧道建筑结构形式多样,因其建设区域、地质条件不同,其施工方法、横断面形式等均有所差别,隧道长度、隧道内车辆运行速度、交通路线数量及所处的地形条件和用途决定了隧道建筑结构的差异。交通隧道从不同的角度有不同的分类方法。

1. 按地形条件划分

根据地形条件,交通隧道可分为山岭隧道、水下隧道、城市隧道等。

1) 山岭隧道

为缩短通行距离和避免出现大坡度的道路而穿越山岭修建的隧道称为山岭隧道。修筑比较平缓的道路是保证车辆安全与行车速度的基本条件。在多山的地区,指望完全在地面上修筑平缓的道路是很困难的,开挖隧道便成为一种较好的选择。尤其在修建铁路和高等级公路时,不得不修建大量的隧道。例如,在我国的西南地区,山地面积占总面积的 90% 以上,发展交通是加强对外联系的重要途径,建造隧道便成为改善交通条件的最适宜选择。根据通行交通工具的不同,山岭隧道主要又可分为公路隧道和铁路隧道。

公路隧道是专供汽车运输行驶的通道。过去,在山区修建公路为降低工程造

价,常选择盘山绕行的方式,宁愿延长距离而避开修建费用昂贵的隧道。随着社会经济和生产的发展,大量出现的高速公路对道路的修建标准进一步提高,如要求道路路线顺直、坡度平缓、路面宽敞等。如此,在道路穿越山区时,就需要修建大量的隧道。隧道的修建在改善公路状态、缩短运行距离、提高运输能力、减少事故等方面起到了重要的作用。

铁路隧道是专供火车运输行驶的通道。铁路穿越山岭地区时,需要克服高程障碍,由于铁路一般情况下最大限坡需小于 24‰,而山岭地区限于地形,无法绕行,常不能通过展线获得所需的高程。此时,开挖铁路隧道穿越山岭成为一种合理的选择,其作用可以使路线缩短、坡度减小、运营条件改善、牵引定数提高等。例如,宝成线宝鸡至秦岭段线路密集地设有 48 座隧道,占铁路总长的 37.75%^[3]。铁路隧道相比于公路隧道,横断面尺度相对较小,但一般来说长度较长。

2) 水下隧道

当交通线路跨越江、河、湖、海、洋时,可以选择的穿越方案有架桥、轮渡和隧道,但架桥受净空的限制,轮渡通行量较小,如果这些矛盾得不到有效的解决,在水底修建隧道不失为一种很好的方案。这种为了加强水域两侧的交通,穿越河流、湖泊或海峡而在水下修建的供汽车和火车运输行驶的隧道称为水下隧道。它的优点是不受气候影响、不影响通航、引道占地少、战时不会暴露交通设施目标等。当然,水下隧道也有其自身缺点,如造价较高,以及一旦损坏极易造成重大人员伤亡和财产损失等。根据所跨区域的不同,这种隧道又可分为跨江隧道、跨海隧道、跨湖隧道等。在我国,近年来水下交通隧道发展迅速。例如,上海修建了多条跨越黄浦江和长江的隧道,其中连接上海市区与崇明岛的跨长江水下隧道,盾构直径为 15m,内径为 13.7m^[4];广州修建了跨越珠江的隧道;南京和杭州修建了跨越湖泊的水下隧道。

3) 城市隧道

城市中为缓解地面交通压力而设置在城市地面以下的隧道,主要包括公路车行隧道和地铁隧道。公路车行隧道通常只限于通行非危险化学品车辆。城市地铁隧道是一种特殊的铁路隧道,是为了解决城市交通问题而建造的特殊轨道交通隧道。在许多大城市中,人口十分集中,加上机动车剧增,地面的道路交通条件严重恶化。发展地铁交通是缓解地面道路阻塞和居民乘车难问题的重要途径,同时对城市整体布局、城市环境等方面都有积极的影响。城市地铁隧道的突出特点是它通过位于地下的地铁车站与地面相连,这使得城市地铁隧道的通风及火灾时的排烟系统都具有不同于其他隧道的特点 and 设计难点。

2. 按照长度分类

根据我国《公路隧道设计规范》(JTG D70—2004)^[5]1.0.4 的规定,按照表 1.1

规定的长度标准,公路隧道分为短隧道、中隧道、长隧道和特长隧道。2007年1月20日,我国迄今最长的公路隧道——秦岭终南山隧道全线通车,该隧道为双洞单向交通隧道,单洞长18.02km。

表 1.1 公路隧道长度分类

分类	特长隧道	长隧道	中隧道	短隧道
长度/m	$L > 3000$	$3000 \geq L > 1000$	$1000 \geq L > 500$	$L \leq 500$

铁路隧道按照长度也分为短隧道、中长隧道、长隧道和特长隧道,分类标准见表1.2^[6]。正在建设的大理至瑞丽铁路高黎贡山隧道长度为34.5km,建成后为国内最长铁路山岭隧道。

表 1.2 铁路隧道长度分类

分类	特长隧道	长隧道	中长隧道	短隧道
长度/m	$L > 10\,000$	$10\,000 \geq L > 3\,000$	$3\,000 \geq L > 500$	$L \leq 500$

3. 按照施工方法分类

按照隧道主要施工方法分类,隧道可以分为明挖法隧道、盖挖法隧道、暗挖法隧道、盾构法隧道、沉管法隧道、掘进机法(TBM)隧道、顶管法隧道等。

1) 明挖法

浅埋的隧道经常采用明挖法,尤其在城市地铁隧道的施工中采用的比较广泛。明挖法施工技术一般可分为围护结构施工、内部土方开挖、工程结构施工、管线恢复及覆土等四大步骤。由于施工技术简单、快速、经济,明挖法常作为开挖隧道的首选方案。明挖法施工的隧道结构通常采用矩形断面,一般为整体浇筑或装配式结构,其优点是其内轮廓与建筑限界接近,内部空间可以得到充分利用,结构受力合理,顶板上便于敷设城市地下管网和设施。

2) 盖挖法

盖挖法常用于城市中修建隧道,可不影响交通。盖挖法在完成围护结构后,构筑一个覆盖结构以承载行车和人流的交通,并在其支护下完成基坑土方的开挖和主体结构的施工。按主体结构的施工顺序,盖挖法可分为盖挖顺作法、盖挖逆作法和盖挖半逆作法。

3) 暗挖法

在交通繁忙的市区修建隧道通常采用暗挖法,主要的暗挖法有新奥法和矿山法等。新奥法(NATM)是充分利用围岩的自承载能力和开挖面的空间约束作用,采用锚杆和喷射混凝土为主要支护手段,对围岩进行加固,约束围岩的松弛和变形,并通过围岩和支护的量测、监控,指导地下工程的施工方式。新奥法的优点是较

好利用岩体力学特性、充分发挥围岩自身的承载能力、合理设计支护结构和施工顺序。矿山法是一种浅埋暗挖法,是在新奥法的基础上针对城市地下工程的特点发展起来的。与新奥法的不同之处在于,它是适合于城市地区松散土介质围岩条件下,隧道埋深小于或等于隧道直径,以很小的地表沉降修筑隧道的技术方法。其突出优势在于不影响城市交通,无污染、无噪声,而且适合于各种尺寸与断面形式的隧道洞室。地下隧道采用矿山法施工时,一般采用拱形结构,其基本断面形式为单拱、双拱和多跨连拱。

4) 盾构法

盾构法(shield driven tunneling)首先是由法国工程师布鲁内尔于 1818 年提出的,是利用盾构机在地面以下暗挖隧道的一种施工方法。盾构法适用于松软地层,施工安全,对地层扰动少,控制围岩周边准确,极少超挖。从世界范围看,盾构法隧道施工技术正在朝长距离、大直径、大埋深、复杂断面和高度动化的方向发展。盾构法的优点主要有:①地面作业很少,只有少数竖井,由噪声、振动引起的环境影响较小;②隧道施工的费用和技术难度基本不受覆土深度的影响,适宜于建造深埋隧道;③穿越河底或海底时,不影响通航,也不受气候的影响;④穿越地面建筑群和地下管线密集的区域时,对周围环境影响较小;⑤自动化程度高、劳动强度低、施工速度较快。盾构法修建的区间隧道衬砌有预制装配式衬砌、预制装配式双层衬砌和模筑钢筋混凝土整体式衬砌、挤压混凝土整体式衬砌三大类。

5) 沉管法

沉管法是修建水下隧道(immersed tunnels)的一种常用方法。按管身材料,沉管隧道大致分为钢壳隧道和钢筋混凝土隧道两类。钢壳沉管的内部断面形状通常为圆形,顶棚以上和底板以下的空腔用来排气和通风。车道较少时用单孔管道,车道较多时则用双孔并联或者多条双孔并联管道。混凝土沉管隧道的断面多呈矩形,对四车道以上的公路隧道尤为适用。

在上面的施工方法中,山岭隧道多数采用矿山法(钻爆法)、掘进机法施工,水底隧道通常采用盾构法、沉管法施工,城市隧道或者潜埋、软土山岭隧道,采用明挖法、盖挖法、新奥法(浅埋暗挖法)、盾构法、顶管法等方法施工。从隧道横断面结构来看,明挖法修建的隧道多为矩形和连拱隧道,盖挖法修建的隧道一般为矩形隧道,矿山法(钻爆法)、新奥法(浅埋暗挖法)、掘进机法修筑的隧道有单拱、连拱、双拱、马蹄形、矩形等隧道,盾构法、沉管法施工的隧道断面形式较为单一,前者为圆形、双圆形隧道,后者为矩形隧道。

1.1.2 隧道的发展^[1,2]

迄今为止,人类所修建的最早的交通隧道是公元前 2180~公元前 2160 年,在古巴比伦城的幼发拉底河下修筑的一条砖砌人行隧道。在 18 世纪,随着蒸汽机火

车所带动的铁路交通的发展,英国先后在铁路上修建了长 770m 的泰勒山单线隧道和长 2474m 的维多利亚双线隧道。在欧洲的其他国家,如法国、意大利等,也相继修建了多条铁路隧道。在 20 世纪初期,欧洲和北美洲一些国家的铁路网开始形成,为此,修建了一批铁路隧道,其中建成的 5km 以上长隧道就有 20 座,最长的瑞士和意大利间的辛普朗铁路隧道,长度更是达到 19.8km^[7]。在亚洲,日本是世界上修建隧道比较多的国家之一,到 20 世纪 70 年代末,日本建成的铁路隧道约 3800 座,总长约 1850km,其中 5km 以上的长隧道达 60 座^[8]。

为了发展现代化的交通,我国也越来越重视修建各类交通隧道。1887~1889 年,在台湾省台北—基隆窄轨铁路上修建的狮球岭隧道,是我国第一座铁路隧道,长 261m^[9]。进入 21 世纪,随着我国经济和社会的快速发展,交通隧道以其不占用有限的地上空间、能够穿越天然屏障、克服地形高程差、改善交通条件和减少对生态环境的破坏等优点,发展尤为迅猛。截至 2011 年底,我国公路隧道建成数为 8552 座,共计 625.34 万米。其中,特长隧道 326 座、143.32 万米,长隧道 1504 座、251.84 万米^[10]。

城市的迅速发展也带动了我国城市水下公路隧道及地铁隧道^[11~21]的快速发展。香港分别在 1972 年、1989 年和 1993 年修建了跨越维多利亚海湾的三条海底隧道:港九中海底隧道(红磡海底隧道)、东区海底隧道和西区海底隧道;上海修建了多条跨越黄浦江的隧道,以及连接上海市区与崇明岛的跨长江水下隧道;广州修建了跨越珠江的隧道;南京和杭州修建了跨越湖泊的水下隧道;武汉市修建了跨越长江的隧道。在城市地铁方面,北京于 1965 年修建了我国的第一条城市地铁,并很快在城市交通中发挥了重要作用。当前,包括北京、上海、广州、天津、深圳、南京等我国 20 多座大城市已经积极地开展了地铁的建设,部分城市的一期线路已经建成通车。

1.2 隧道的结构特点

隧道的建筑结构主要包括隧道主洞本体及其附属用房两大部分。显然,隧道主洞主体是人们主要关心的部分。除了隧道主洞,出于维修和安全使用的考虑,有些双向隧道内还需要修建一些连接两个相邻单向隧道的横洞。这种横洞根据用途的不同,又可分为人行横洞和车行横洞,车行横洞的设置间距一般要比人行横洞大。平时,横洞与隧道连通的门关闭,在特殊需要或紧急状态时,将这些门打开,人员就可从一条隧道进入另一条隧道。有些特长隧道还修建了与主隧道平行的辅助隧道,它们通过一些横洞与主隧道相通,两条主隧道之间为较小的辅助隧道。这种辅助隧道平时可供维修与人员通行使用,紧急情况下可用于人员的安全疏散^[1,2,22]。

虽然人们主要关心隧道本体的火灾安全,但对隧道辅助用房火灾安全也应当给予足够重视。隧道辅助用房指的是为隧道正常运营而设置的管理和设备用房,如隧道控制室、管理人员办公用房、变(配)电所、自备发电机房、消防应急器材库等。大部分辅助用房是设在隧道之外的,但也有一些设备用房不得不设在隧道之内。此外,隧道建筑中还有一些为确保车辆在隧道中安全高效行驶而设置的交通控制设施,用于控制车辆流量、车速、行车道和车辆行驶方向等。它们一旦发生故障不仅会影响交通的正常进行,而且可能引发其他事故。下面简要介绍一下隧道的主要结构参数。

1. 隧道平面线形及纵断面线形

隧道平面线形设计应遵循隧道服从路线、路隧结合的原则,除此之外还要着重考虑地形、地质、水文条件。隧道内平面线形最好采用直线。线路顺直,则行车视线好,通风阻力小,洞内交通安全程度明显提高。但当受到地形限制,特别是道路走向需要时,往往采用曲线隧道。隧道中曲线设置原则是采用较大的曲线半径和较短的曲线长度,并尽量设在洞口附近,以减少其不利影响。隧道内纵断面线形考虑行车安全性、营运通风规模、施工作业条件和排水要求,纵坡不小于 0.3%,一般不大于 3%^[5,6]。受地形限制时,高速公路、一级公路中的中短隧道可适当加大,但不宜大于 4%^[5]。

2. 隧道建筑限界与净空

隧道净空是指隧道衬砌内轮廓线所包围的空间,是根据隧道建筑限界确定的。隧道建筑限界是指衬砌内缘不得侵入的轮廓线,是为了保证隧道内各种交通的正常运行与安全而规定的,在一定的宽度和高度范围内不得有任何障碍物的空间范围。隧道的内轮廓必须符合隧道建筑限界,结构的任何部位都不应侵入限界以内。从经济观点出发,在满足隧道建筑限界尺寸的前提下应尽量减少隧道开挖断面。由于使用车辆对象的不同,公路隧道和铁路隧道在建筑限界与净空的设计上具有一定的差异。同时,隧道内轮廓还应考虑通风、照明、安全、监控等设施安装所必需的空间。

公路隧道建筑空间的有限性是用隧道横断面净空及其建筑限界来描述的。公路隧道横断面净空包括了其建筑限界、其他功能性断面,以及富裕量和施工允许误差等。图 1.1 为公路隧道的射流风机、火灾自动报警系统等的安装位置与隧道限界的关系。

铁路隧道建筑空间设计较公路(道路)隧道更为复杂,铁路隧道净空因列车牵引方式、运行速度的不同,故设计标准不同,图 1.2 为高速铁路典型双线隧道净空横截面图。

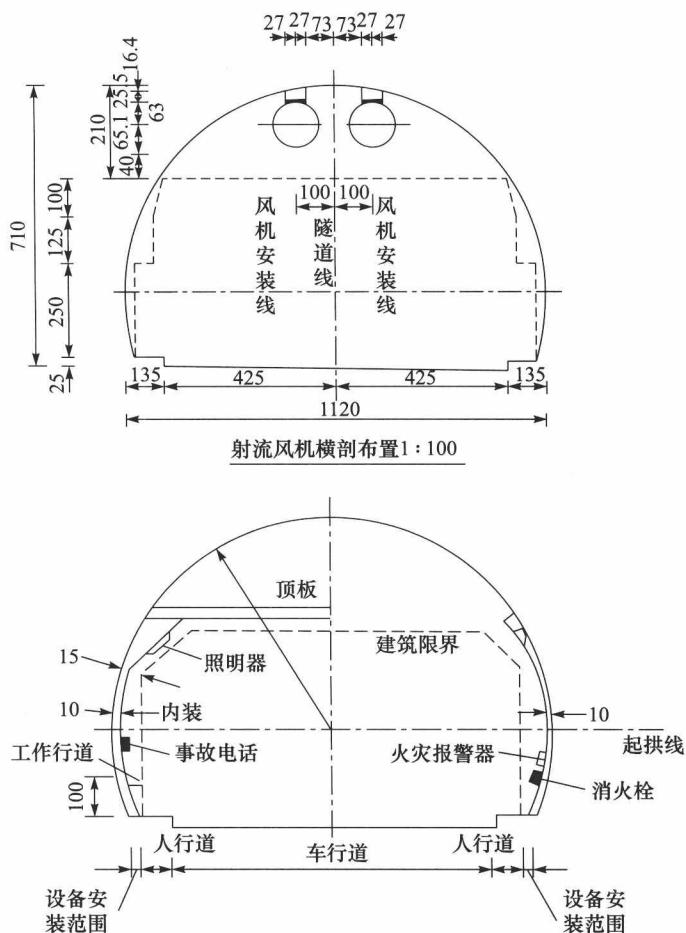


图 1.1 公路隧道净空横断面及相关消防设施的安装位置示意图(单位:cm)

3. 隧道附属建筑

公路隧道除了主洞,为保证车辆的安全通行,还必须修建一些附属设施,主要包括车行横洞、人行横洞、紧急停车带、设备洞室、电缆沟、排水沟等。

1) 车行横洞和人行横洞

车行、人行横通道的设置应能满足火灾时人车安全疏散和灭火救援的需要。平时,横洞主要作为巡查、维修、养护的联络道使用,并可作为隧道局部检修时车辆转换方向、并道的过渡通道使用;火灾和其他紧急情况下,横洞的主要作用是疏导交通、临时避难,以及作为人车安全疏散、灭火及抢险救援通道使用。人行横通道的设置间距一般不得大于 500m;车行横通道的设置间距一般不得大于 1000m,长

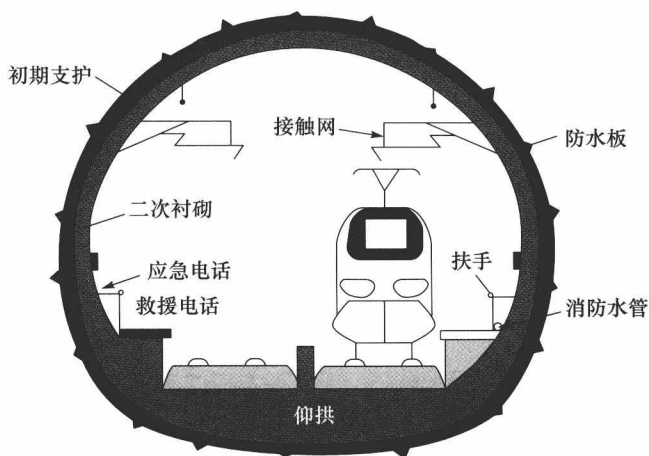


图 1.2 高速铁路双线隧道建筑净空横截面及相关消防设施的安装位置示意图

1000~1500m 的隧道宜设置一处,中、短隧道可不设^[5]。

2) 紧急停车带

当隧道内行驶中的车辆发生故障时应及时离开干道进行避让,以免发生交通事故。紧急停车带就是专供紧急停车使用的停车位置。尤其在长大隧道中,故障车辆必须尽快离开行车道,否则会导致追尾交通事故,引起交通阻塞。因此,高速公路隧道根据隧道长度,一般均应设置紧急停车带。

3) 设备洞室

对长大公路隧道而言,特别是高速公路隧道中设有消防设备、供电设备、通信设备、控制设备和检测设备等,这些设备都需要一个空间来安装,因此需要预留相应的洞室。这些洞室应该做到统一规划,尽量使其分布均匀,使用功能齐全,几何尺寸一致,避免杂乱,讲究美观。

4) 电缆沟及排水沟

长大隧道一般设置通风、照明、监控等机电设施,其供电电缆、控制电缆都需要敷设在不同的电缆沟槽内。所以,一般需要在隧道检修道下部设置电缆沟槽,电缆沟槽一般与排水沟一并考虑,并在适当位置引入或引出电缆的人井或手井。隧道一般都设置纵向排水沟,以便将渗漏到洞内的地下水和车道上的积水,顺路线方向排出洞外。排水沟断面按照排水量计算确定,采用钢筋混凝土盖板遮盖。

1.3 隧道火灾的典型案列

1. 澳洲 Burnley 隧道火灾^[23]

Burnley 隧道全长 3.4km,每日超过 10 万辆车通行,其中货车占 1.4 万辆,采

用单孔单向设计,与其平行的 Domain 隧道虽然分属两座不同隧道,但它们之间有一互通的联络通道。

1) 事故原因

2007年3月,Burnley 隧道口发生一辆货车抛锚,虽然隧道信息显示标志及时通知了司乘人员左线车道封闭及限速缩减等信息,但仍发生三辆货车及四辆小客车连环追撞,进而造成爆炸,随后引发火灾。

2) 人员伤亡及损失

因及时疏散人员,启动相关应急设备,此次事故最后火势在事故发生后 1h 内被扑灭,但也造成了 3 人死亡、2 人轻伤及数辆车烧毁。隧道内因喷水系统适时动作,将火势控制在一定范围内,使内部电气设备、路面柏油等仅遭受轻微的毁损,隧道关闭 4 天后重新开放。

3) 后续改善

(1) 在隧道入口加设紧急栅栏,当隧道内发生交通意外时,以阻止其他车辆进入隧道内。

(2) 重新拟定司乘人员的驾驶手册,包括在隧道内的安全驾驶。

(3) 在接近隧道的路段,设置标志提醒驾驶人将车速从 100km/h 减低至 80km/h。

(4) 增设更多限速标志。

2. 日本 Nihonzaka 隧道火灾^[24]

Nihonzaka 隧道全长 2.045km,是东名高速道路上最长的隧道,为双孔单向设计。

1) 事故原因

1979年7月,Nihonzaka 隧道下行线的烧津市出口约 400m 处先有 2 台大货车追撞,随后陆续导致 4 台大货车和 2 台小客车等连环追撞,导致起火燃烧,浓烟在隧道内迅速蔓延。隧道管理单位虽已及时确认事故发生地点,但在通报消防机关时却先选择请求离事故地点较远的消防队支援救火,直到发觉后,紧急通报距离较近的消防队要求出动支持,但为时已晚。因隧道管理单位通报错误,导致错过黄金灭火时机而造成火势未能及时控制。

2) 人员伤亡及损失

此次火灾事故造成隧道内的大部分防灾设备烧毁,致使其在灭火过程中未发挥作用。火灾持续燃烧约 159h。最后,7 人死亡、2 人受伤及 173 辆车烧毁,隧道约 1.1km 严重损毁,也造成日本东西向的流通动脉瘫痪、交通混乱打结,对于经济的影响相当重大。此次事故造成隧道主体及各项防灾设备严重损坏。

3) 后续改善

在当时的标准规范中,并没有要求隧道内各项设备需采用防火措施,但在此例