

本书受国家科技支撑计划和交通部西部交通建设科技项目资助



# 公路隧道衬砌结构 耐火技术

林志 郭军 闫治国 著



科学出版社

国家科技支撑计划和交通部西部交通建设科技项目资助

# 公路隧道衬砌结构耐火技术

林 志 郭 军 闫治国 著

科 学 出 版 社

北 京

## 内 容 简 介

本书针对公路隧道衬砌结构在火灾源、火灾时温度梯度分布、衬砌结构损伤与高温力学行为、火灾后衬砌检测评价方法、安全修复技术、衬砌结构耐火与防火设计等方面开展了系统研究,相关成果构成了本书的基础。本书一方面是考虑在实际可能的火灾场景下,探讨公路隧道衬砌结构体系在高温下的损伤机理和力学特性,为评定公路隧道衬砌结构体系的火灾安全性提供科学依据;另一方面以预防为目的,为防火设计提供符合隧道实际情况的有效的耐火方法,提高我国公路隧道衬砌结构体系的整体耐火能力和火灾安全性。

本书适合隧道设计、施工、试验检测和养护管理方面的技术人员阅读。

### 图书在版编目(CIP)数据

公路隧道衬砌结构耐火技术 / 林志, 郭军, 闫治国著.  
—北京: 科学出版社, 2018.7  
ISBN 978-7-03-045092-0

I. ①公… II. ①林… ②郭… ③闫… III. ①公路隧道-隧道衬砌-衬砌结构-耐火性-研究 IV. ①U459.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 138483 号

责任编辑: 华宗琪 朱小刚 / 责任印制: 罗 科  
责任校对: 邓丽娜 / 封面设计: 墨创文化

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>

四川煤田地质制图印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2018年7月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2018年7月第一次印刷 印张: 17 1/4 插页: 8 面

字数: 400 千字

定价: 95.00 元

# 序

随着我国高等级公路的高速发展，公路隧道规模也在持续增加，截止 2014 年底，已有 12400 余座公路隧道投入运营。随着公路隧道长度、交通量的增加，隧道内的火灾事故不断发生，造成的损失逐年上升。前期，业内更加关注火灾事故后人员的逃生与救援，开展了大量研究和实践。但大量隧道火灾事故也表明，火灾除了对隧道内人员造成巨大伤害外，还会由于高温导致混凝土爆裂和力学性能的劣化，对衬砌结构产生不同程度的损坏，大大降低结构的承载力和安全性，甚至造成隧道坍塌，危及临近建构筑物，影响人员疏散和灭火救援工作。火灾后隧道结构的修复和重新组织交通也需要花费大量的人力、物力和时间成本。特别是对于水下隧道，还存在由于结构破坏而导致隧道无法修复的可能。而长期以来，对此方面的相关研究较少，系统研究火灾对公路隧道衬砌结构的损害形式、机理以及公路隧道衬砌结构火灾高温下力学性能的变化，正确评价火灾后衬砌结构的安全性，进而给出合适的隧道衬砌结构耐火方法就成为公路隧道快速发展背景下的一项重要任务。

本书作者在业内较早就开始关注这一问题，并在交通部西部交通建设科技项目和国家科技支撑计划的资助下，依托港珠澳沉管隧道工程和大量山岭公路隧道工程，搭建了 3 套结构火灾实验系统，分别从结构试件、构件和原型隧道 3 个层面开展了大量试验和理论分析研究，对火灾源、火灾场景、衬砌结构损伤与高温力学行为、火灾后衬砌检测评价方法、安全修复技术、衬砌结构耐火与防火设计以及沉管隧道结构火灾力学行为、耐火保护技术等方面开展了系统研究。成果为隧道与地下工程结构体系的火灾安全性评定提供科学依据，同时为结构防火设计提供符合实际情况的耐火方法，对于提高隧道与地下工程结构的火灾安全性具有重要的理论意义和实用价值。

现在，他们将研究成果撰写成书正式出版。这是一件推动隧道与地下工程结构耐火保护技术发展极为有利的好事，填补了公路隧道结构火灾防护和灾后评估修复技术方面的空白。我也有幸见证了他们整个研究过程，充分肯定他们的研究成果，他们务实不懈的研究精神值得大家学习。在此，特向《公路隧道衬砌结构耐火技术》一书的正式出版表示祝贺。

西南交通大学教授



# 前 言

我国已成为世界上公路隧道最多、最复杂和发展最快的国家。截至 2013 年,我国已经有 1 万余座公路隧道投入运营。随着公路隧道交通长度、交通密度的增加,隧道内的火灾事故也不断增加,因火灾造成的损失呈逐年上升趋势。由于环境的封闭性和逃生救援的困难性,隧道内一旦发生火灾,除了会对隧道内的人员造成巨大伤害外,还会由于高温导致混凝土爆裂和力学性能的劣化,对衬砌结构产生不同程度的损坏,大大降低结构的承载力和安全性。

隧道是陆地及水下交通道路的控制性节点工程,对隧道衬砌结构进行事先耐火保护,以及事后检测、诊断、评价与修复,是一项十分重要的工作,这也是当前乃至将来管理、设计、施工和运营等部门面临的主要问题与难题之一。系统分析与探讨火灾对公路隧道衬砌结构的损害形式、机理以及公路隧道衬砌结构在火灾高温情况下力学性能的变化,正确评价火灾后衬砌结构的安全性,进而给出合适的隧道衬砌结构耐火方法是当前一项重要任务,这对于提高公路隧道衬砌结构的火灾安全性具有重要的理论价值和实用意义。

从国内外研究现状来看,在隧道衬砌结构耐火保护方面尚存在以下问题:①国内没有针对公路隧道衬砌结构的专用防火设计、加固与修复技术规范,隧道衬砌结构耐火设计的相关规范和标准有所欠缺;②对于隧道衬砌结构体系,考虑其所处环境的特殊性(周围岩土体)、混凝土爆裂、火灾温度高及持续时间长等对衬砌内温度场分布的影响的研究很少;③隧道衬砌结构体系是一个超静定体系,由升温引起的温度应力以及附加变形对衬砌结构有较为严重的安全影响,因传统上人们认为衬砌结构是耐火的,所以目前人们对该问题重视不足;④在火灾对隧道衬砌结构体系的损害形式及机理、提高隧道衬砌结构耐火性能的方法等方面目前还未见系统研究;⑤关于隧道衬砌结构现场火灾损伤检测方法与评价模型还未见报道,尤其是评价模型方面的研究成果在国内尚属空白;⑥我国已编制的《公路隧道养护技术规范》(JTG H12—2003)对于火灾后隧道结构的加固修复尚没有统一的标准和定论,还有待提出适合于公路隧道火灾损伤后的加固修复技术;⑦缺乏大体积混凝土构件高温火灾试验平台,试件多采用电炉进行加热,这与隧道结构遭受火灾时的实际情况很不一致;⑧对沉管隧道结构在火灾下的力学行为及其耐火保护技术的研究十分缺乏。

本书受国家科技支撑计划“港珠澳大桥跨海集群工程建设关键技术与示范”(编号:2011BAG07B00)和交通运输部西部交通建设科技项目“公路隧道衬砌结构耐火技术研究”(编号:2008 318 740 41)资助,针对公路隧道衬砌结构受火灾的安全影响,在火灾源、火灾时温度梯度分布、衬砌结构损伤与高温力学行为、火灾后衬砌检测评价方法、安全修复技术、衬砌结构耐火与防火设计以及沉管隧道结构火灾力学行为、耐火保护技术等方面开展了系统研究,相关成果构成了本书的基础。

由于本书所研究的相关内容还处于探索阶段,加之作者水平有限,书中难免有疏漏,恳请读者批评指正。

# 目 录

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 .....              | 1  |
| 1.1 隧道火灾概述 .....            | 1  |
| 1.1.1 公路隧道火灾回顾 .....        | 1  |
| 1.1.2 隧道火灾的原因 .....         | 3  |
| 1.1.3 隧道火灾的特点 .....         | 4  |
| 1.1.4 隧道火灾的破坏性 .....        | 5  |
| 1.2 国内外研究现状 .....           | 6  |
| 1.2.1 国内外相关的研究组织与机构 .....   | 6  |
| 1.2.2 国内外隧道防火安全研究项目 .....   | 7  |
| 1.2.3 相关标准、规范及导则 .....      | 9  |
| 1.2.4 隧道衬砌结构耐火技术研究现状 .....  | 10 |
| 1.3 隧道衬砌结构耐火技术的现实意义 .....   | 15 |
| 第 2 章 公路隧道衬砌结构耐火目标 .....    | 17 |
| 2.1 火灾场景定义 .....            | 17 |
| 2.2 标准火灾曲线及其不足 .....        | 18 |
| 2.2.1 标准火灾曲线 .....          | 18 |
| 2.2.2 标准火灾曲线(火灾场景)的不足 ..... | 20 |
| 2.3 基于标准火灾曲线的隧道耐火目标 .....   | 21 |
| 第 3 章 公路隧道火灾场景设计 .....      | 26 |
| 3.1 公路隧道火灾场景的研究方法 .....     | 26 |
| 3.2 隧道火灾案例研究 .....          | 28 |
| 3.2.1 公路隧道火灾 .....          | 28 |
| 3.2.2 铁路隧道火灾 .....          | 31 |
| 3.2.3 地铁隧道火灾 .....          | 31 |
| 3.2.4 隧道火灾试验 .....          | 32 |
| 3.3 公路隧道火灾场景关键参数的确定 .....   | 32 |
| 3.3.1 火灾升温速率 .....          | 32 |
| 3.3.2 火灾中达到的最高温度 .....      | 35 |
| 3.3.3 火灾持续时间 .....          | 39 |
| 3.3.4 降温阶段的温度变化 .....       | 40 |

|            |                               |           |
|------------|-------------------------------|-----------|
| 3.3.5      | 温度横向分布 .....                  | 41        |
| 3.3.6      | 温度纵向分布 .....                  | 44        |
| 3.4        | 公路隧道火灾场景设计方法 .....            | 45        |
| 3.4.1      | 基准曲线的定义 .....                 | 45        |
| 3.4.2      | 隧道火灾场景的确定 .....               | 45        |
| <b>第4章</b> | <b>CFD 计算理论与隧道火灾温度场 .....</b> | <b>49</b> |
| 4.1        | 隧道火灾 CFD 模拟研究现状 .....         | 49        |
| 4.2        | CFD 研究的理论基础 .....             | 49        |
| 4.2.1      | 守恒方程 .....                    | 49        |
| 4.2.2      | 分析模型 .....                    | 50        |
| 4.3        | 隧道火灾 CFD 求解方法 .....           | 55        |
| 4.3.1      | 控制方程的通用形式 .....               | 55        |
| 4.3.2      | 建立离散方程的方法 .....               | 55        |
| 4.3.3      | 离散方程的基本解法 .....               | 56        |
| 4.4        | 隧道火灾 CFD 模拟建模方法 .....         | 57        |
| 4.4.1      | 计算软件的使用 .....                 | 57        |
| 4.4.2      | 建模中关键参数的处理 .....              | 57        |
| 4.5        | 利用 CFD 软件确定火灾场景 .....         | 59        |
| 4.5.1      | 模型的建立 .....                   | 60        |
| 4.5.2      | 隧道内温度场的分布特征 .....             | 62        |
| <b>第5章</b> | <b>衬砌结构火灾损伤 .....</b>         | <b>72</b> |
| 5.1        | 衬砌混凝土标准试块高温试验 .....           | 72        |
| 5.1.1      | 总体试验方案 .....                  | 72        |
| 5.1.2      | 试验具体方案 .....                  | 74        |
| 5.1.3      | 试块高温烧蚀结果 .....                | 76        |
| 5.1.4      | 总体损伤特征 .....                  | 77        |
| 5.1.5      | 试块烧损等级划分 .....                | 82        |
| 5.2        | 隧道衬砌的损伤现象及形式 .....            | 82        |
| 5.2.1      | 衬砌损伤的表观现象 .....               | 82        |
| 5.2.2      | 衬砌损伤特征与形式 .....               | 84        |
| 5.3        | 隧道衬砌损伤机理 .....                | 84        |
| 5.3.1      | 变色 .....                      | 84        |
| 5.3.2      | 开裂 .....                      | 85        |
| 5.3.3      | 烧酥剥落 .....                    | 85        |
| 5.3.4      | 高温爆裂 .....                    | 85        |
| 5.3.5      | 高温后隧道衬砌混凝土的抗渗性能 .....         | 86        |
| 5.3.6      | 隧道衬砌混凝土力学性能高温劣化 .....         | 87        |

|       |                                 |     |
|-------|---------------------------------|-----|
| 5.3.7 | 火灾高温导致衬砌结构体系内力变化及变形 .....       | 92  |
| 5.4   | 本章小结 .....                      | 92  |
| 第 6 章 | 衬砌结构火灾高温力学行为 .....              | 94  |
| 6.1   | 计算方法与模型 .....                   | 94  |
| 6.1.1 | 公路隧道火灾场景 .....                  | 94  |
| 6.1.2 | 隧道衬砌结构内温度场分布的计算方法 .....         | 95  |
| 6.1.3 | 材料的热工参数取值 .....                 | 96  |
| 6.1.4 | 混凝土的热物理参数 .....                 | 98  |
| 6.1.5 | 断面尺寸与形式 .....                   | 98  |
| 6.1.6 | 火灾工况 .....                      | 100 |
| 6.2   | 火灾下衬砌结构的温度 .....                | 101 |
| 6.3   | 火灾下衬砌结构的变形 .....                | 104 |
| 6.4   | 火灾下衬砌结构的内力 .....                | 108 |
| 6.5   | 隧道截面尺寸的影响 .....                 | 111 |
| 6.6   | 火灾下衬砌的承载力及整体安全性 .....           | 114 |
| 第 7 章 | 衬砌结构火灾高温承载力计算方法 .....           | 116 |
| 7.1   | 结构高温承载力的计算理论 .....              | 116 |
| 7.1.1 | 基本假设 .....                      | 116 |
| 7.1.2 | 高温极限 $N_{uT}-M_{uT}$ 相关曲线 ..... | 116 |
| 7.1.3 | 大偏心受压时极限承载力 .....               | 119 |
| 7.1.4 | 小偏心受压时极限承载力 .....               | 119 |
| 7.2   | 结构高温承载力的计算方法 .....              | 120 |
| 7.2.1 | 积分法 .....                       | 120 |
| 7.2.2 | 条分法 .....                       | 121 |
| 7.2.3 | 等效截面法 .....                     | 123 |
| 第 8 章 | 衬砌结构火灾损伤检测评价 .....              | 125 |
| 8.1   | 检测方法综合评价 .....                  | 125 |
| 8.2   | 高温损伤混凝土检测方法研究 .....             | 126 |
| 8.2.1 | C20 混凝土 .....                   | 126 |
| 8.2.2 | C25 混凝土 .....                   | 130 |
| 8.2.3 | C30 混凝土 .....                   | 132 |
| 8.2.4 | C35 混凝土 .....                   | 134 |
| 8.2.5 | 回弹法专用检测曲线 .....                 | 137 |
| 8.2.6 | 超声波法专用检测曲线 .....                | 138 |
| 8.3   | 公路隧道衬砌结构火灾损伤评价方法研究 .....        | 140 |
| 8.3.1 | 广义荷载-结构法高温承载力评价模型 .....         | 140 |

|             |                           |            |
|-------------|---------------------------|------------|
| 8.3.2       | 广义荷载-结构法评价模型基本原理 .....    | 141        |
| 8.3.3       | 截面温度分布计算方法 .....          | 144        |
| 8.4         | 两车道公路隧道衬砌结构火灾损伤等级 .....   | 147        |
| 8.4.1       | 隧道设计概况 .....              | 147        |
| 8.4.2       | 火灾场景选取 .....              | 148        |
| 8.4.3       | 计算工况 .....                | 149        |
| 8.4.4       | IV~V级衬砌损伤评价分级 .....       | 150        |
| 8.5         | 公路隧道高温损伤评估方法与程序 .....     | 151        |
| 8.5.1       | 衬砌灾后检测评估方法和判据 .....       | 151        |
| 8.5.2       | 损伤深度检测方法 .....            | 156        |
| 8.5.3       | 衬砌火灾后损伤评估程序 .....         | 159        |
| <b>第9章</b>  | <b>火灾后衬砌修复加固技术 .....</b>  | <b>163</b> |
| 9.1         | 衬砌结构损害分类 .....            | 163        |
| 9.2         | 公路隧道衬砌结构的修复原则 .....       | 163        |
| 9.3         | 混凝土结构修复方法 .....           | 164        |
| 9.3.1       | 喷水养护法 .....               | 164        |
| 9.3.2       | 压力浸渍修复法 .....             | 164        |
| 9.3.3       | 加大截面加固法 .....             | 165        |
| 9.3.4       | 外包钢加固法 .....              | 166        |
| 9.3.5       | 粘钢加固法 .....               | 166        |
| 9.3.6       | 预应力加固法 .....              | 167        |
| 9.3.7       | 化学植筋加固法 .....             | 167        |
| 9.3.8       | 喷射混凝土加固法 .....            | 167        |
| 9.3.9       | 增设支撑体系及受力墙的加固法 .....      | 168        |
| 9.3.10      | 粘贴碳纤维加固法 .....            | 168        |
| 9.3.11      | 内嵌碳纤维加固法 .....            | 170        |
| 9.4         | 隧道衬砌结构修复方法 .....          | 171        |
| 9.4.1       | 换拱法 .....                 | 171        |
| 9.4.2       | 套拱法 .....                 | 172        |
| 9.4.3       | 喷射混凝土加固法 .....            | 173        |
| 9.4.4       | 锚喷加固法 .....               | 174        |
| 9.4.5       | 外部补筋法 .....               | 176        |
| <b>第10章</b> | <b>隧道衬砌结构耐火保护技术 .....</b> | <b>177</b> |
| 10.1        | 概述 .....                  | 177        |
| 10.2        | 表面隔热降温防护 .....            | 177        |
| 10.3        | 混凝土中掺加纤维 .....            | 182        |
| 10.3.1      | 概述 .....                  | 182        |

|               |                                |            |
|---------------|--------------------------------|------------|
| 10.3.2        | 隧道衬砌纤维混凝土耐火性能试验 .....          | 186        |
| 10.4          | 安装喷淋灭火系统 .....                 | 190        |
| 10.5          | 提高保护层耐火能力 .....                | 191        |
| 10.6          | 其他防火方法(防火耐热混凝土) .....          | 195        |
| 10.7          | 耐火技术的技术经济对比 .....              | 197        |
| 10.8          | 衬砌结构耐火保护设计方法 .....             | 198        |
| 10.8.1        | 隧道衬砌结构耐火保护的目标与思路 .....         | 198        |
| 10.8.2        | 隧道衬砌结构耐火保护技术的试验方法 .....        | 199        |
| <b>第 11 章</b> | <b>沉管隧道结构耐火保护技术 .....</b>      | <b>201</b> |
| 11.1          | 保护措施及现状 .....                  | 201        |
| 11.1.1        | 既有耐火措施分类 .....                 | 201        |
| 11.1.2        | 既有防火方案技术经济比较 .....             | 202        |
| 11.2          | 耐火保护对象 .....                   | 202        |
| 11.3          | 总体研究方案 .....                   | 204        |
| 11.4          | 管节结构构件耐火保护试验 .....             | 205        |
| 11.4.1        | 试验工况 .....                     | 205        |
| 11.4.2        | 试验构件制作 .....                   | 205        |
| 11.4.3        | 防火材料安装 .....                   | 207        |
| 11.4.4        | 测点布置 .....                     | 211        |
| 11.4.5        | 试验结果分析 .....                   | 211        |
| 11.5          | 管节接头构件耐火保护试验 .....             | 218        |
| 11.5.1        | 试验工况 .....                     | 218        |
| 11.5.2        | 管节接头构件制作 .....                 | 219        |
| 11.5.3        | 管节接头耐火保护方案及安装 .....            | 219        |
| 11.5.4        | 温度测点布置 .....                   | 222        |
| 11.5.5        | 试验结果分析 .....                   | 222        |
| 11.6          | 节段接头构件耐火保护试验 .....             | 226        |
| 11.6.1        | 试验工况 .....                     | 226        |
| 11.6.2        | 节段接头构件制作 .....                 | 227        |
| 11.6.3        | 节段接头耐火保护方案及安装 .....            | 228        |
| 11.6.4        | 温度测点布置 .....                   | 228        |
| 11.6.5        | 试验结果分析 .....                   | 229        |
| 11.7          | 本章小结 .....                     | 231        |
| <b>第 12 章</b> | <b>沉管隧道接头及结构火灾力学行为分析 .....</b> | <b>233</b> |
| 12.1          | 沉管隧道结构内部三维温度场 .....            | 233        |
| 12.1.1        | 基于升温曲线的三维火灾场景 .....            | 233        |
| 12.1.2        | 温度场有限元实现与参数选取 .....            | 235        |

|            |                    |     |
|------------|--------------------|-----|
| 12.1.3     | 无防火隔热时管节结构温度 ..... | 237 |
| 12.1.4     | 有防火隔热时管节结构温度 ..... | 238 |
| 12.2       | 管节结构火灾力学行为 .....   | 239 |
| 12.2.1     | 计算断面选取 .....       | 240 |
| 12.2.2     | 有限元模拟方法及其模型 .....  | 240 |
| 12.2.3     | 荷载组合及计算图示 .....    | 242 |
| 12.2.4     | 管节结构火灾下的变形 .....   | 244 |
| 12.2.5     | 管节结构火灾下的应力 .....   | 246 |
| 12.2.6     | 有、无防火措施的受力对比 ..... | 248 |
| 12.2.7     | 火灾高温应力损伤 .....     | 249 |
| 12.3       | 接头火灾力学行为 .....     | 251 |
| 12.3.1     | 管节接头变形 .....       | 251 |
| 12.3.2     | 管节接头剪力 .....       | 253 |
| 12.3.3     | 节段接头剪力 .....       | 255 |
| 12.3.4     | 防火板对接头剪力的影响 .....  | 257 |
| 12.4       | 本章小结 .....         | 258 |
| 参考文献 ..... |                    | 260 |
| 彩色图版 ..... |                    | 265 |

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 隧道火灾概述

### 1.1.1 公路隧道火灾回顾

公路隧道是为使公路从地层内部通过而修建的建筑物，是一种与外界直接连通且有限的相对封闭空间。近年来，随着交通运输业的高速发展，隧道交通也在快速发展。据交通运输部公布的统计数据，截至 2012 年年底，全国公路隧道有 10022 座，里程 8052.7km。今后十年内还将有许多山岭公路隧道和公路越江隧道建成并投入使用。

作为交通道路上的关键线路和控制性节点，隧道内频繁发生的火灾事故造成了巨大的社会影响和经济损失。例如，1949 年，美国纽约的 Holland 公路隧道火灾事故，造成 66 人死亡，48 人受伤，9 辆卡车被烧毁，交通中断 56h。1977 年，上海打浦路越江隧道发生火灾，造成 5 人死亡，23 人受伤。1999 年，位于法国和意大利之间的勃朗峰公路隧道发生火灾，大火烧了 53h，造成 41 人死亡，43 辆车被烧毁，交通中断一年半以上。1999 年，位于奥地利中部穿越阿尔卑斯山的托恩(Tauern)公路隧道发生火灾，导致 13 人死亡，50 人受伤。2001 年 10 月，瑞士圣哥达(St. Gotthard)隧道起火，造成 20 人死亡，128 人失踪，出事地段顶部塌陷，这条最重要的南北通道被迫无限期关闭。2002 年，中国甬台温公路猫狸岭隧道发生火灾，约 100m 的隧道壁瓷砖和混凝土面层脱落破损。2002 年 3 月，法国巴黎在建的 A86 双层隧道发生火灾，约有 80m 的混凝土剥落。2005 年 6 月 4 日，位于法国和意大利之间的弗雷瑞斯(Frejus)公路隧道发生火灾，造成 2 人死亡，多辆汽车被烧毁。另据统计，1991~2001 年，上海市延安东路隧道共发生 4 起火灾事故。1977~2002 年，上海市打浦路隧道共发生 18 起火灾事故。表 1-1 不完全统计了全世界近 50 年发生的公路隧道火灾事故<sup>[1,2]</sup>。

表 1-1 世界公路隧道火灾事故情况

| 时间     | 隧道名称             | 长度/m  | 国家地区         | 持续时间  | 隧道结构破坏程度     |
|--------|------------------|-------|--------------|-------|--------------|
| 1949 年 | Holland          | 2250  | 美国纽约         | 4h    | 隧道严重损坏 200m  |
| 1968 年 | Moorfleet(图 1-1) | 243   | 德国汉堡         | 1.5h  | 隧道严重损坏 34m   |
| 1974 年 | Mont Blanc       | 11600 | 法国、意大利       | 15min | —            |
| 1976 年 | Crossing BP-A6   | 430   | 法国巴黎         | 1h    | 隧道严重损坏 150m  |
| 1979 年 | Nihonzaka(图 1-2) | 2045  | 日本 Shitzuoka | 159h  | 隧道严重损坏 1100m |
| 1980 年 | Kajiwara         | 740   | 日本           | —     | 隧道严重损坏 280m  |

续表

| 时间     | 隧道名称                | 长度/m  | 国家地区                      | 持续时间     | 隧道结构破坏程度                      |
|--------|---------------------|-------|---------------------------|----------|-------------------------------|
| 1982 年 | Caldecott           | 1028  | 美国 Oakland                | 2h+40min | 隧道严重损坏 580m                   |
| 1983 年 | Pecorila Galleria   | 662   | 意大利                       | —        | 受损较轻                          |
| 1986 年 | L'Arme              | 1105  | 法国 Nice                   | —        | 隧道设备严重损坏                      |
| 1987 年 | Gumefens            | 343   | 瑞士伯尔尼                     | 2h       | 损坏较轻                          |
| 1990 年 | Roldal              | 4656  | 挪威 Roldal                 | 1h       | 略微损坏                          |
| 1993 年 | Serra Ripoli        | 442   | 意大利                       | 2.5h     | 损坏较轻                          |
| 1993 年 | Hovden              | 1290  | 挪威 Hoyanger               | 1h       | 111m 隔热材料被毁                   |
| 1994 年 | Huguenot            | 3914  | 南非                        | 1h       | 严重损坏                          |
| 1995 年 | Pfander             | 6719  | 澳大利亚                      | 1h       | 严重损坏                          |
| 1996 年 | Isola delle Femmine | 148   | 意大利 Palermo               | —        | 严重损坏, 关闭 2.5d                 |
| 1999 年 | Mont Blanc(图 1-3)   | 11600 | 法国、意大利                    | 48h      | 严重损坏, 混凝土窟窿全部沙化, 关闭 3 年       |
| 1999 年 | Tauern              | 6401  | 奥地利 A10 Salzburg-Spittal  | 17h      | 严重损坏, 结构被烧坏 600m              |
| 2000 年 | Seljestad           | 1272  | 挪威 E134 Drammen-Haugesund | 45min    | —                             |
| 2001 年 | Prapontin           | 4409  | 意大利                       | —        | 关闭 7d                         |
| 2001 年 | Gleinalm            | 8320  | 奥地利                       | —        | —                             |
| 2001 年 | St. Gotthard        | 16918 | 瑞士                        | 3d       | 严重受损, 隧道圆拱顶部塌陷, 关闭 60d        |
| 2001 年 | Guldborgsund        | 460   | 丹麦 E47 海底隧道               | —        | —                             |
| 2002 年 | A86 双层隧道            | 10000 | 法国巴黎                      | —        | 混凝土脱落 80m                     |
| 2005 年 | Frejus              | 13000 | 法国、意大利                    | 6h       | 火灾时隧道内温度高达 900℃, 几千米长的设施被严重破坏 |

频繁发生的火灾事故使得人们越来越关注隧道的火灾安全性, 并对隧道心存恐惧, 阻碍了人们对隧道的积极使用。此外, 火灾预警、救援的困难性也阻碍了隧道技术的发展, 使得长隧道方案由于火灾安全问题而难以实施。各国在总结这些火灾经验教训的基础上, 组织大量人力及物力对隧道火灾的特点及火灾预防与救援进行了较系统的研究。

有学者对公路隧道的火灾频率进行过研究, 发现公路隧道火灾频率为 2 次/(亿·车·千米), 即 1000m 长的隧道 4~7 年有一次火警, 2000m 长的隧道 2~3 年有一次火警<sup>[3]</sup>。



图 1-1 Moorfleet 隧道火灾



图 1-2 Nihonzaka 隧道火灾

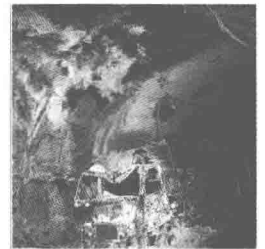


图 1-3 Mont Blanc 隧道火灾

图 1-1~图 1-3 所示为一些火灾事故发生后的实际情况。文献[4]总结了国内外关于公路隧道火灾频率的统计分析结果,如表 1-2 所示。从中可推断出,随着隧道数量和里程的不断增加以及电气化程度在公路隧道中的不断提高,预计未来在公路隧道内发生的火灾事故也会越来越多。

表 1-2 公路隧道火灾频率<sup>[4]</sup>

| 地区 | 火灾频率<br>/[次/(亿·车·千米)] | 说明                                      |
|----|-----------------------|-----------------------------------------|
| 英国 | 2                     | Alex Harter, 通风; 公路隧道的消防, 隧道译丛, 1989. 8 |
| 英国 | 10                    | 高等级公路隧道防火与消防, 公路隧道文件, 1990              |
| 国外 | 10~17                 | JTJ026-90 公路隧道设计规范, 北京: 人民交通出版社, 1990   |
| 国外 | 20                    | 钱章龄, 上海延安东路越江隧道的消防系统会议资料, 1989          |
| 日本 | 0.5                   | 吉田幸信, 公路隧道的防火设备, 隧道译丛, 1989. 8          |

1.1.2 隧道火灾的原因

引起公路隧道火灾原因是多方面的,主要原因可以归纳为以下 3 类:车辆自身的机电设备发生故障导致起火;车辆撞击等交通事故;车辆装载货物起火。

图 1-4 所示为公路隧道火灾形成原因统计图<sup>[2]</sup>,从图中可以看出,车辆自身的机电设备发生故障导致起火以及车辆撞击等交通事故是诱发隧道火灾的两个主导因素,这两个因素引发的火灾占公路隧道火灾总调研案例的 97.44%。

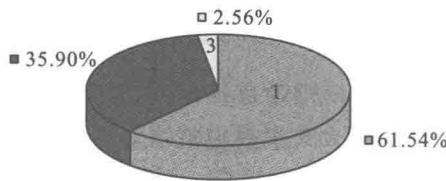


图 1-4 公路隧道火灾形成原因统计图

1-车辆自身的机电设备发生故障导致起火; 2-车辆撞击等交通事故; 3-车辆装载货物起火

隧道火灾本质上是一种伴随发热、发光的剧烈燃烧过程,其发生需要同时具备三个条件:可燃物、助燃性和火源。通过隧道的车辆中,汽车本身就是可燃的。其他如油罐车、装载易燃易爆物品的货车,其装载的油品一般为原油或石油制品(汽油、煤油、柴油等),这些油品都是低闪点的易燃液体(几种常见油品的性质见表 1-3),在常温常压下就能挥发出多种易燃、易爆的碳氢混合气体。

表 1-3 常见可燃物的性质

| 可燃物 | 闪点/℃   | 自燃点/℃   | 爆炸极限/% |      |
|-----|--------|---------|--------|------|
|     |        |         | 爆炸下限   | 爆炸上限 |
| 汽油  | -45~10 | 415~530 | 1.3    | 6    |
| 煤油  | 28~15  | 380~425 | 0.6    | 8    |
| 柴油  | 50~90  | 300~380 | 0.6    | 6.5  |

续表

| 可燃物 | 闪点/℃ | 自燃点/℃   | 爆炸极限/% |      |
|-----|------|---------|--------|------|
|     |      |         | 爆炸下限   | 爆炸上限 |
| 原油  | —    | 350     | 1.1    | 6.4  |
| 木材  | —    | 250~350 | —      | —    |
| 甲烷  | —    | 537     | 5      | —    |
| 乙烷  | —    | 472     | 3.12   | —    |
| 丙烷  | —    | 446     | 2.9    | —    |
| 丁烷  | —    | 430     | 1.9    | —    |
| 甲醇  | —    | 470     | —      | —    |
| 乙醇  | —    | 414     | —      | —    |

通风提供的氧气是很好的助燃物，当氧气和易燃、易爆气体混合的浓度处在爆炸极限范围内时，若遇明火，就会燃烧或发生爆炸。

根据资料统计，隧道事故中常见的火源有明火、电火花(如切断电源时)、静电火花(如油品震摇)、摩擦(如刹车时产生火花或温度升高)和撞击(引起局部高温)等。同时，隧道内电气线路或电气设备短路起火、汽车化油器燃烧起火、紧急刹车时制动器起火、汽车交通事故起火和车上装载的易燃物品爆炸起火等都可以引起火灾。

通过分析众多火灾案例可以发现，车辆、线路与电气设备是隧道火灾的主要危险源。从英国消防研究中心的统计资料来看，大约每行车  $10^7$  km 平均发生 0.5~1.5 次隧道火灾，其中 1% 是罐车火灾，平均每座隧道 18 年左右发生一次罐车火灾事故，包括油罐车、可燃物罐车和有毒化学品罐车。

同时，随着行车密度的增长，使得带有各种可燃物质(油、化工原料等)的车辆通过隧道的数量和频率都在增加，因此火灾事故也就增多了。此外，行车速度的提高以及隧道内线路质量的下降，隧道内电气设备的增多，以及人为破坏的增多(如纵火、抽烟和恐怖主义等)，都使得隧道火灾事故呈逐年上升的趋势。

1.1.3 隧道火灾的特点

公路隧道属于地下建筑结构，由于地下建筑位置的特殊性和空间的局限性，其相对封闭的环境给火灾后疏散、救援、排烟和从外部灭火造成了困难。隧道火灾和地面火灾的特征明显不同，主要有以下几点。

①燃烧猛烈，温度高，烟气毒性大，火灾扑灭难度大。

②失火爆发成灾的时间一般为 5~10min，持续时间与隧道外的环境有关，较大的火灾一般为 30min 至数小时。隧道内散热条件比洞外差，与露天洞外火灾相比，隧道火灾的温升速度要快许多。

③受隧道净空限制，火焰向水平方向延伸，炽热气流可顺风传播很远，可燃的能量最多 10% 传给烟气，大部分传给衬砌和围岩，故烟气温度随距离的增加而迅速下降，但由于洞壁被加热后的辐射热，温度可保持很长一段时间。

④隧道火灾一般会出现两种类型：富氧型和燃烧丰富型。较小的火灾更容易产生大量的烟雾并充满整座隧道，以至于在使用强力照明的条件下，能见度也只在1m以内。同时，有毒烟雾的传播，将使现场人员中毒而死亡。

⑤隧道内一旦起火，由于烟囱效应，温度和烟雾会迅速传播，它的大部分能量被用来加热通风的空气。此时，顺风侧的空气温度可达到1000℃以上，炽热的空气在流经途中可把它的热量传递到任何易燃或可分解的材料上。这样，火就能从一个燃料火源“跳跃”一个长度而引燃下一个着火点。实验中观察到这个“跳跃”的长度约为隧道直径的50倍。

⑥隧道火灾将极大地影响隧道内空气压力的分布，导致隧道内通风气流的流动加速、减速或完全逆向流动；隧道火灾由于有强烈的热量，只能从逆风端去救火。然而，烟的这种逆向流动将会阻碍救火工作的进行。

⑦安全疏散困难，极易发生次生灾害。火灾发生后，人们情绪紧张，造成拥挤、交通混乱等情况，极易导致发生意外伤亡事故。

⑧洞内火灾产生的热烟，首先集中在隧道顶部，而隧道下部很长一段仍是新鲜空气。当洞内有较大的纵向风流时，才会使隧道全断面弥漫烟气，使人迷失方向并有可能中毒死亡。

⑨火灾发生后，产生的热量大部分被隧道壁和拱顶吸收，隧道内的温度迅速上升，最高温度可超过1000℃。调查报告表明，2005年弗雷瑞斯隧道发生火灾时，隧道内的温度甚至达到了1650℃。在如此高的温度下，车辆和隧道内的电力、通信和照明设备基本上被烧毁，隧道衬砌支护结构在骤然升温和高时间的高温作用下产生的破坏也相当严重。对于水下隧道，还有因结构被破坏而导致隧道修复困难的可能性，甚至出现隧道涌水、塌陷。

#### 1.1.4 隧道火灾的破坏性

公路隧道发生火灾后，排烟与散热条件差，烟雾浓度大，能见度低，人员疏散困难，温度高而且上升速度快，消防、救火难度大，损坏程度严重，这主要体现在以下几方面：①火灾时产生的大量有毒有害烟雾，不仅降低了隧道内的能见度，影响人员和车辆的逃生以及救援工作的开展，而且也是造成人员伤亡的主要原因；②火灾时产生的高温，不仅烧坏隧道内部的装修，对衬砌产生巨大的损坏，致使结构的承载力降低或完全丧失，而且对隧道防水体系的损坏，会造成隧道不同程度的渗漏水，以致影响隧道的正常运营及功能的发挥；③火灾使隧道内的电气设备与元器件及线路受到损坏，无法为动力、照明等用电设备供电，通信、通风及给排水设备无法运转，致使救援难度增大；④火灾时产生的火风压会极大地影响整个通风系统的正常运转，导致隧道内正常的通风系统发生紊乱，致使灾害扩大。如果火灾生成的火风压是正值，则在风机停止运转后，在火风压的作用下，火烟仍继续向各个区域蔓延，引起人身伤亡事故。

## 1.2 国内外研究现状

世界各国,特别是发达国家,对隧道火灾的防治非常重视,并开展了大量研究活动。

公路隧道火灾的预防救援设计始于19世纪20年代。1924年,匹兹堡市长1.18km的自由隧道因交通堵塞,引起乘客CO中毒。后来,美国长2783km的荷兰隧道吸取了自由隧道的教训,设计了全横向机械通风方式,并在隧道内设置了消防、交通信号、电话、交通监控、火灾检测和电视监视等设备。日本在第二次世界大战结束后,开始着手建设公路隧道,并兴建了世界上最长的公路隧道——关越隧道,在该隧道中,首次采用了电集尘器的竖井送排式纵向分段通风方式,为长大公路隧道的设计、施工和运营提供了可靠的经验。此外,日本高速公路的长大隧道、道路公团所属隧道和一般公路隧道,都按现行的防灾标准,设置了报警设备、紧急电话、电钮式报警机和火灾探测器及消防设备。

从世界范围看,公路隧道内发生火灾的频率在逐渐增大,仅欧洲公路隧道内每年发生火灾100多起。英国公路隧道1971~1973年共发生了14次火灾,其中8次由载货汽车引起,6次由各种商务汽车引起。日本道路公团所属隧道自1960年以来共发生火灾24起,日本高速公路公团所属隧道在1964~1979年共发生火灾31起。根据日本道路公团与首都高速道路公团所属隧道火灾事故记录,1977~1980年,东名和名桂两条高速公路上发生隧道火灾6起,其发生频率为5.76次/(兆·车·千米)。

因此,近20年来,奥地利、瑞士和日本等国家对隧道内汽油火灾进行了大量的模拟隧道火灾试验及研究,提出了公路隧道防火救灾对策,国际道路协会也提出了新建隧道消防设计及消防规定。

### 1.2.1 国内外相关的研究组织与机构

#### 1. 国际隧道协会

国际隧道协会(International Tunnelling Association, ITA)下设两个工作组开展隧道及地下工程火灾安全方面的研究:Working Group 5 Healthy and Safety 与 Working Group 6 Repair and Maintenance of Underground Structures。此外,2005年新成立了COSUF(the ITA Committee on Operational Safety of Underground Facilities),进行地下空间安全运营方面的研究。

ITA发布的关于隧道火灾的指导性标准主要有 *Guidelines for Good Occupational Health and Safety Practice in Tunnelling* (WG5)和 *Guidelines for Structure Fire Resistance for Road Tunnels* (WG6)。

#### 2. 世界道路协会

世界道路协会(Permanent International Association of Road Congresses, PIARC)C5技术委员会(PIARC Committee on Road Tunnels)下设有 Working Group No. 6 Fire and Smoke Control 工作组,开展隧道火灾方面的研究工作。