

国外道路最新技术与标准规范译丛

公路隧道火灾及烟气控制

国外道路标准规范编译组 编译

Fire and Smoke Control in Road Tunnels



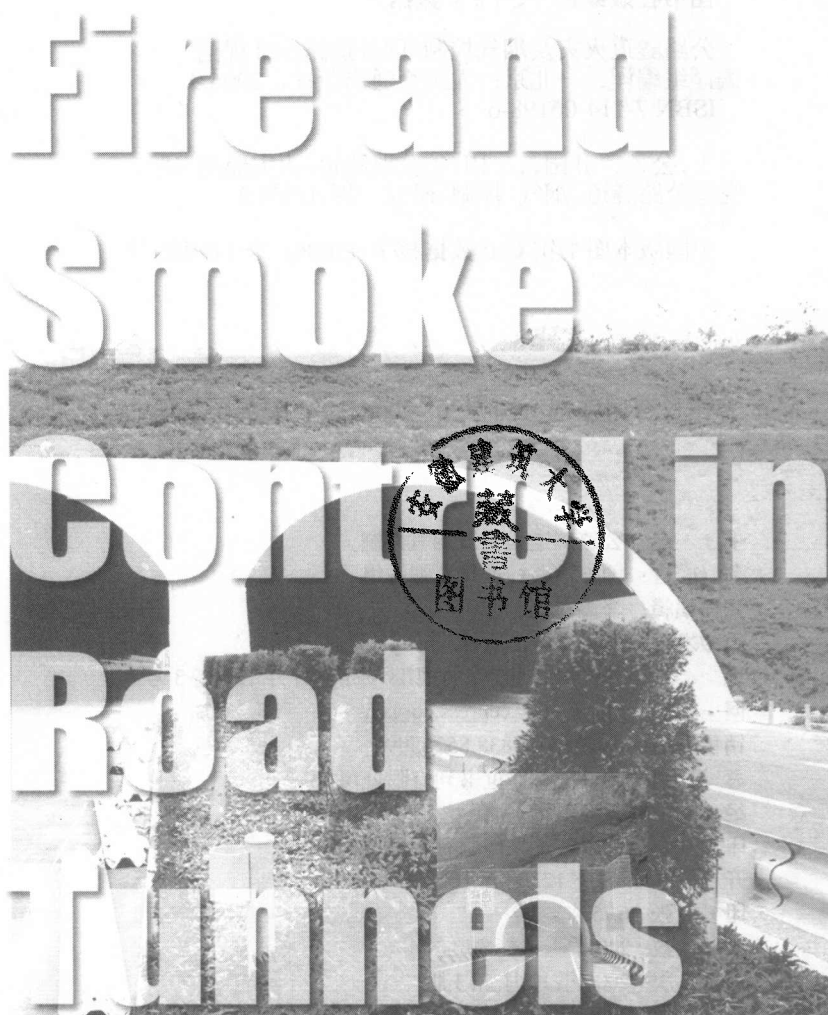
人民交通出版社
China Communications Press

国外道路最新技术与标准规范译丛

公路隧道火灾及烟气控制

国外道路标准规范编译组 编译

Fire and
Smoke
Control in
Road
Tunnels



图书馆

人民交通出版社

内 容 提 要

本书是世界道路协会各个隧道研究工作组多年的研究成果,内容涉及隧道火灾风险评估、隧道消防安全工程设计方法、隧道结构安全、隧道通风及防排烟设计、隧道安全疏散及消防救援以及隧道安全运营等方面。

虽然原规范没有对隧道设计作强制性规定,但文中对隧道安全的各个方面的安全标准、保护原理、设计考虑重点、推荐设计等均作了科学地、明确地阐述,对研究或设计人员来讲,无论从对隧道火灾的理解还是具体设计操作均具有非常实用的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

公路隧道火灾及烟气控制/国外道路标准规范
编译组编译. —北京:人民交通出版社, 2006.9
ISBN 7-114-06198-6

I.公... II.国... III.①公路隧道-火灾监测-研究②公路隧道-烟气-控制-研究 IV.U459.2

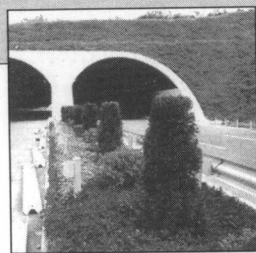
中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 119086 号

著作权合同登记 图字:01-2006-5761 号

书 名: 公路隧道火灾及烟气控制
著 作 者: 国外道路标准规范编译组
责任编辑: 李 农
出版发行: 人民交通出版社
地 址: (100011)北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号
网 址: <http://www.ccpress.com.cn>
销售电话: (010)85285838,85285995
总 经 销: 北京中交盛世书刊有限公司
经 销: 各地新华书店
印 刷: 北京鑫正大印刷有限公司
开 本: 880×1230 1/16
印 张: 6.75
字 数: 240 千
版 次: 2006 年 10 月 第 1 版
印 次: 2006 年 10 月 第 1 次印刷
书 号: ISBN 7-114-06198-6
定 价: 35.00 元
(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)



西部交通建设科技项目
国外道路标准规范编译组



组 长：赵晋和 周 伟

副组长：石宝林 王 辉 杨新洲

成 员：赵之忠 成 平 张建军 张宝胜 严 红 杨屹东

李春风 柏松平 郑代珍 张 杰 桂海生 饶黄裳

周紫君 孙小端 何 勇 高海龙 黄海明 贾 渝

汪双杰 罗满良 王选仓 吴德兴 鲍卫刚 陈济丁

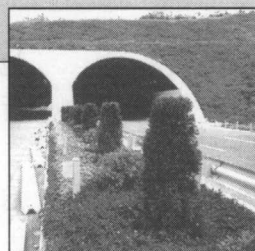
项乔君 王元庆 陈海云 王明年 张慧或

本册编译人员：王明年 陈海云

本册审校人员：陈海云 王明年



编译说明 *Bianyi Shuoming*



我国公路工程标准化工作经过几十年发展,公路工程标准规范体系逐渐完善,内容愈加丰富。目前,已形成一套基本上满足我国公路交通发展需要的公路工程标准规范体系。为借鉴国外先进技术和标准规范的成功经验,使我们在编制标准规范的理念上紧跟发达国家,更好地与国际接轨,不断改进和完善我国公路工程标准规范体系,全面提高我国公路交通行业的科研生产技术水平,交通部于2004年下达西部交通建设科技项目——国外公路工程标准规范研究及编译,根据项目任务书的要求,由交通部科学研究院、中国公路技术交流中心组织国内相关科研院所和高校,编译了这套《国外道路最新技术与标准规范译丛》。其主要内容涉及公路工程、公路桥梁、公路隧道、道路安全和环境保护等方面,共计16册。它的出版发行必将为提高我国公路工程的设计、施工和养护管理水平提供重要的技术依据,同时,也将推动我国公路交通技术进步和科技创新。

我国专业隧道设计研究院及消防部门已逐渐意识到隧道防火的必要性。但现行的几个涉及隧道的国家和行业标准,如1992年发布的国家现行标准《地下铁道设计规范》(正在修订)、1985年发布的铁道部现行标准《铁路隧道设计规范》、1989年发布的交通部现行标准《公路隧道设计规范》(正在修订),仅分别对地铁、铁路隧道和山岭公路隧道的防火与疏散做了部分规定,均不够完善,并且未对隧道结构的防火设计做出明确规定。此外,国家标准《建筑设计防火规范》增补有关城市交通隧道(地铁除外)的防火设计要求正在讨论中,还未定稿发行。因此,可以说与国外的研究相比,我们在隧道安全设计方面还远不够完善,在某些领域甚至是空白。因此,我们将世界道路协会出版发行的推荐性规范《公路隧道火灾及烟气控制》编译并引入我国,具有非常现实的意义。虽然目前在我国还未有重大隧道灾难事故发生,但作为研究工作者及政策制定者,应该未雨绸缪,吸取国外的教训和经验,努力将我们的交通隧道安全标准和性能与国际接轨。从此立足点出发,我们希望该规范的出版发行能够对我国的隧道研究、设计及相关规范标准制修订起

到抛砖引玉的作用。

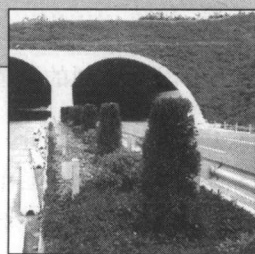
本书由八个部分组成,其中第一部分至第五部分由西南交通大学地下工程系王明年翻译,第六部分至第八部分由公安部天津消防研究所陈海云翻译;陈海云、王明年对全书进行统校。

由于译者水平有限,书中所用术语、译文不尽合适,翻译不妥之处,恳请读者批评指出。

编译组

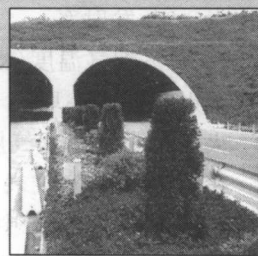
2006年9月

目录 *Mulu*



1 火灾及烟气控制的目标	1
1.1 介绍	1
1.2 PIARC 前期工作	1
1.3 现行指导文件	1
1.4 物理原理及背景资料	1
1.5 建议与要求	7
1.6 未来研究方向	8
2 火灾风险和设计火灾	9
2.1 介绍	9
2.2 PIARC 的前期研究	9
2.3 火灾发生频率	10
2.4 设计火灾的选择	15
2.5 设计火灾场景	18
2.6 未来研究方向	20
3 烟气运动	21
3.1 介绍	21
3.2 PIARC 前期工作	21
3.3 烟气运动及扩散概述	21
3.4 火灾试验中的烟气运动与扩散	22
3.5 隧道坡度的影响	24
3.6 总结	24
4 研究分析方法	25
4.1 介绍	25
4.2 PIARC 前期工作	25
4.3 全尺(等比例模型)试验	26
4.4 缩尺(小比例模型)试验	29
4.5 计算机模拟	31

4.6 未来研究方向	37
4.7 总结	38
5 用于烟火控制的隧道通风设备	40
5.1 通风系统简介	41
5.2 PIARC 前期工作	45
5.3 现行指南与经验	45
5.4 新的研究成果与理论	45
5.5 火灾烟气控制的通风设计目标	45
5.6 自然通风的建议与要求	46
5.7 纵向通风的建议与要求	46
5.8 完全横向与半横向机械通风的建议与要求	52
附录 A 荷兰开发耐火风机的经验	55
6 紧急出口与其他安全设施	60
6.1 介绍	60
6.2 紧急出口与疏散路线	61
6.3 其他安全设施	64
6.4 未来研究方向	76
7 隧道火灾反应与耐火性能	77
7.1 介绍	77
7.2 PIARC 前期工作	77
7.3 材料遇火反应	78
7.4 隧道结构的耐火性能	80
7.5 隧道设备耐火性能	83
附录 B PIARC 公路隧道防火设计标准(2001 年 2 月发表)	84
8 火灾应急管理	87
8.1 介绍	87
8.2 PIARC 前期工作	87
8.3 现有经验	87
8.4 建议与要求	89
8.5 未来研究方向	90
参考文献	91
后记	96



1 火灾及烟气控制的目标

1.1 介绍

本章主要阐述公路隧道中火灾及烟气控制的目标。

理想上,该目标应该是以性能为基础的要求形式来表达,而不是细节化的“处方式”规定。我们希望将来能够做到这一点,但是目前隧道内的安全要求在很大程度上还是以细节化的规范为基础。这主要是由于缺乏相关知识和缺乏普遍认可的分析方法及工具所致。

本章尝试从定性和定量两个角度来设定火灾及烟气控制的目标。这些目标可以解释在第4章中所讨论的各种分析方法的结果,同时也为第4章至第8章中提出的建议及要求提供一个研究背景。

除了简要介绍 PIARC 前期工作和当前所采用的指导文件外,本章大部分内容(第1.4节)将阐述火灾物理原理的研究背景,最后(第1.5节)提出相关建议。

1.2 PIARC 前期工作

公路隧道委员会最早是在第二十届世界公路大会^[17]报告中说明了对烟火控制目标的建议。

1.3 现行指导文件

直到现在,还没有一部以公路隧道性能要求而表达的指南,所有的指导文件还是以细节化的规范为基础。

1.4 物理原理及背景资料

为了理解和解释防火规范的目标,有必要先了解一些基础知识,如火灾的物理特性、逃生人员和消防人员可以承受的极限环境条件,以及隧道结构和设备的破坏标准等。为了判断人员能否安全疏散,首先要取得相关数据,例如人员的步行速度、自火灾发生到疏散开始的时间,其中包括了火灾探测、报警、人员反应和弃车等所需的时间。

1.4.1 不同形式的火灾危害

火灾会产生高温、热辐射、缺氧、低能见度和各种致命的毒性和(或)腐蚀性气体。所有这些物理现象会对人员生命、建筑结构、设备和车辆造成危害,其中某些现象可以计算并得到某种精度的数值。

1.4.2 热辐射

辐射是由高温所产生的,在温度均匀的无限烟气层中,可以由下列公式表达:

$$E_f = 5.67 \times 10^{-8} \times \epsilon_r \times T^4 \quad (\text{W/m}^2) \quad (1-1)$$

式中： ϵ_r ——发射率；

T ——烟气温度的(K)。

辐射值的大小取决于烟气的温度及其发射率，当烟气层中的温度不均匀时，需要通过积分来计算。

火焰本身和热烟气层都会产生辐射(图 1-1)。

在图 1-2 中，实线表示逃生人员所承受的来自温度均匀的无限烟气层的辐射计算值。虚线则对应于在宽 8m、高 6m 的隧道中，当烟气层扩散到距路面以上 3m 高度时的辐射值。两种情况下 ϵ_r 均取 0.8。火源附近由于受火焰的影响，辐射值应有所增加。

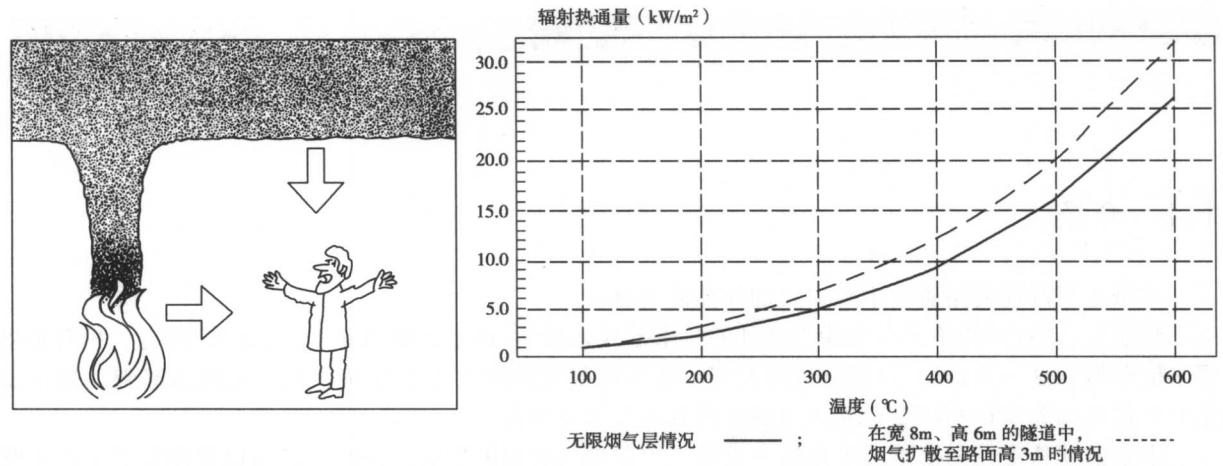


图 1-1 逃生人员所承受的辐射来源

图 1-2 路面热辐射值

在图 1-3 中，海姆斯^[7]给出了各种辐射热通量下，暴露时间至 100s 时，达到烧伤程度的忍受时间值。例如，在暴露时间为 100s 时，11kW/m² 的热通量将导致 50% 的死亡率。

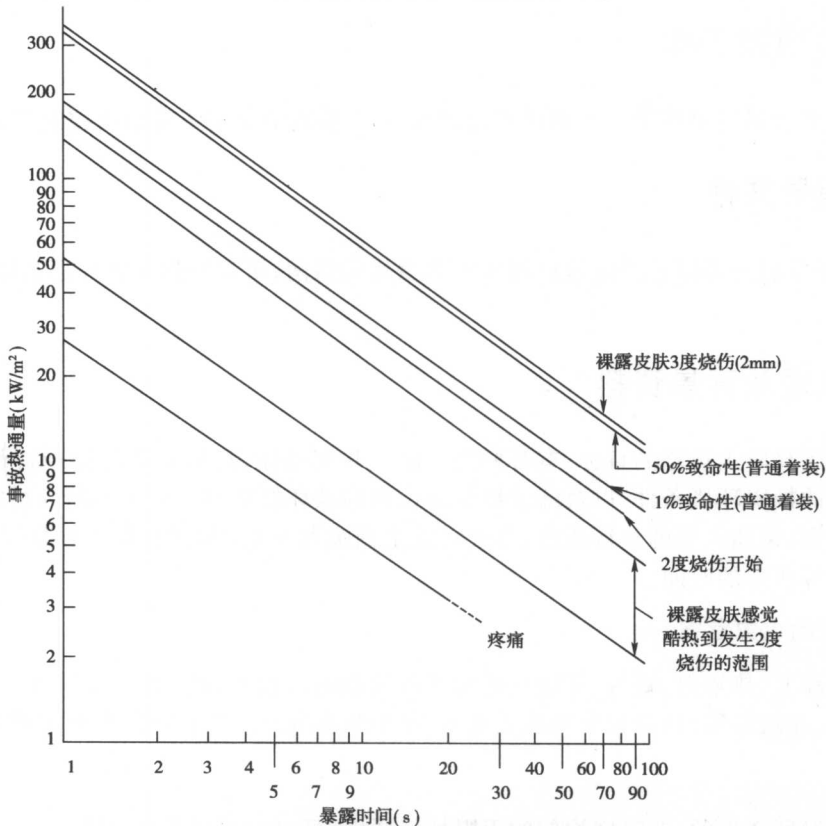


图 1-3 辐射烧伤的忍受极限时间

在图 1-4 中, 柏萨^[13]给出了当辐射热通量维持 2.5kW/m^2 不变情况下, 出现一条明显的可忍受强度极限曲线。其中字母“a”到“e”引用不同文献及研究报告的不同数值。

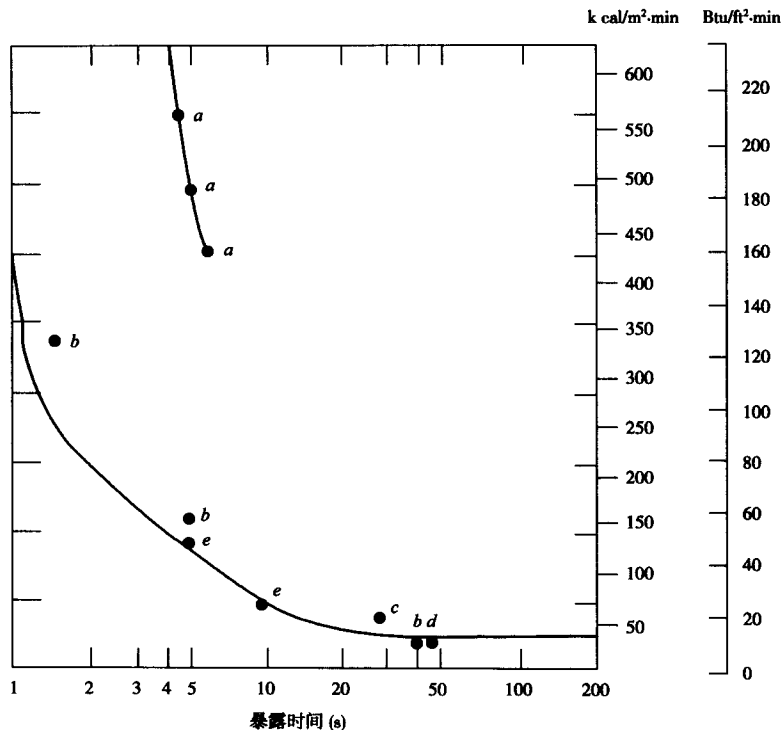


图 1-4 不同辐射热量造成皮肤剧烈疼痛的时间

在图 1-5 中, 丹尼尔森^[3]给出了皮肤感到疼痛的时间与辐射强度的关系曲线。 P 表示身着不同服装的安全系数: 裸露皮肤 $P = 1$, 消防防护装 $P = 26$ 。

1.4.3 温度与对流热

图 1-6 中, 柏萨^[13]给出了由对流空气引起的恒定温度下的忍受时间曲线。字母“a”到“d”取自不同文献的数值。忍受时间是指皮肤感受到疼痛或极端高热的时间。例如在潮湿环境下, 温度为 80°C 时, 人所能忍耐的时间为 15min 。

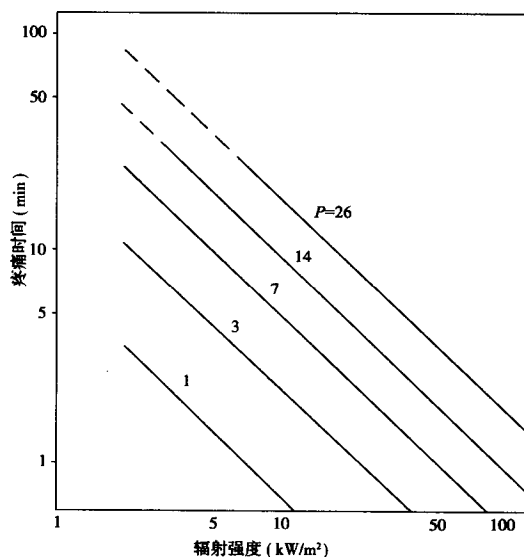


图 1-5 不同辐射强度和安全系数下皮肤感到疼痛的时间

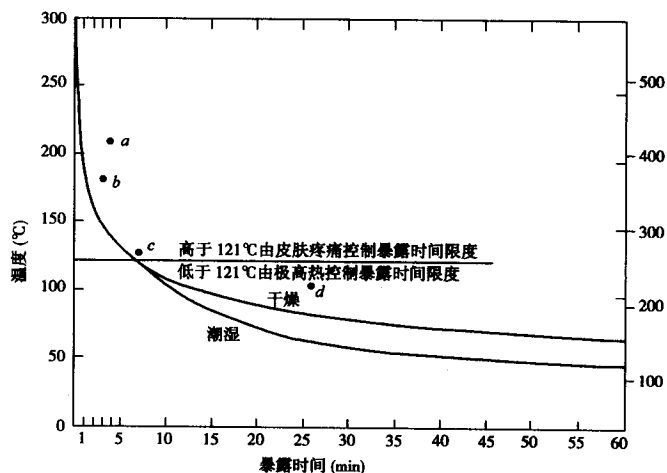


图 1-6 对流热-忍受时间关系曲线

式(1-2)为潮湿环境下忍受时间的表达式:

$$T_{in}(\text{min}) = (\text{出现失能状态的时间}) = e^{5.1849 - 0.0273 T} \quad (1-2)$$

式中: T ——温度($^{\circ}\text{C}$)。

在通常情况下,温度会变化而不是一个常数,则需要引入“剂量”概念。当忍受时间以指数曲线表达时,就可以认为受害者是承受了一定“剂量”的对流热而失去行为能力,而每分钟所承受的热失能分数剂量以下式确定:

$$F_{in} = \frac{1}{e^{5.1849 - 0.0273 T}} \quad (1-3)$$

式中: T ——在那一分钟内的温度($^{\circ}\text{C}$)。

当累积分数剂量超过 1 时,就会对人员生命造成威胁。

如表 1-1 所给出的例子,在 2.5 ~ 3min 之内,累积分数剂量超过了 1,因而可以预测在 3min 之前,人员就会由于皮肤疼痛和烧伤而失去行为能力,在第 4min 之内,极有可能发生致命的皮肤烧伤及上呼吸道受阻的现象。

表 1-1 特定火灾中温度与预测累积热失能分数剂量关系

时间(min)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
温度($^{\circ}\text{C}$)	38	38	44	83	173	295	461	479
F_{in}	0	0	0.007	0.028	0.428	12.739		
$\sum F_{in}$	0	0	0.007	0.035	0.463	13.202		

昂得鲁斯^[11]给出了单一温度下的忍受时间值:

140 $^{\circ}\text{C}$ 5min
115 $^{\circ}\text{C}$ 20min
70 $^{\circ}\text{C}$ 60min
50 $^{\circ}\text{C P}$ 3 ~ 5h

很明显,不同的研究人员给出忍受时间极限值会有所不同。

1.4.4 能见度

烟气的特性一般以(光)穿透度和光学密度或衰减系数(也称消光系数)共同表达。

烟气的穿透度 T 定义如下:

$$T = l_x / l_0 \quad (1-4)$$

式中: l_0 ——光的初始强度;

l_x ——光通过一段路径长度后所余留的强度。

单位长度的光学密度 δ 与穿透度的关系如下:

$$\delta = -(\lg T) / x \quad (1-5)$$

式中: x ——光的传播距离(即路径长度)。

单位长度的衰减(消光)系数 K 的定义与光学密度相同,但采用自然对数形式:

$$K = -(\ln T) / x \quad (1-6)$$

$$K = 2.303 \delta \quad (1-7)$$

有时也采用昏暗度 λ 表示,其定义如下:

$$\lambda = 100(1 - T) \quad (1-8)$$

将式(1-8)代入式(1-5),得到光学密度与昏暗度的关系式如下:

$$\delta = \frac{\lg(1 - \lambda/100)}{x} \quad (1-9)$$

表 1-2 比较了以不同方式表达烟气特性的数值。
能见度距离 $D(\text{m})$ 可以通过空气—烟气混合物的衰减(消光)系数 $K(\text{m}^{-1})$ 计算:

表 1-2 不同方式表达烟气特性的数值比较

穿透度 T	昏暗度 λ	路径长度 $x(\text{m})$	光学密度 $\delta(\text{m}^{-1})$	衰减系数 $K(\text{m}^{-1})$
1.00	0	任何值	0	0
0.90	10	1	0.0458	0.1054
		10	0.0046	0.0105
0.60	40	1	0.222	0.511
		10	0.022	0.051
0.30	70	1	0.523	1.204
		10	0.052	0.120
0.10	90	1	1.00	2.30
		10	0.10	0.23
0.01	99	1	2.00	4.61
		10	0.20	0.46

$$D = A / K \quad (1-10)$$

式中: A ——常数,根据标志的可视状况(反光或发光)在 2~6 范围内取值。

Fujimara^[6]指出 $K = 0.4$ 是公路隧道中烟气衰减系数的临界值。图 1-7 给出了刺激性和非刺激性烟气中发光标志的能见度与衰减系数之间的关系曲线。

1.4.5 毒气气体

火灾烟气的毒性主要是由少数几种气体决定的,这些气体的作用可能会相互增强,也可能会相互抵消。

例如 CO 和 HCN 的相互增强作用可以表示为:

$$A = \frac{[\text{CO}]}{\text{LC}_{50}\text{CO}_{30}} + \frac{[\text{HCN}]}{\text{LC}_{50}\text{HCN}_{30}} \quad (1-11)$$

其中, $[\quad]$ 内的数值表示气体的实际浓度。

$\text{LC}_{50}\text{CO}_{30} = 4600 \times 10^{-6}$ (仅暴露于 CO 气体 30min 后,会导致 50% 死亡率的浓度)

$\text{LC}_{50}\text{HCN}_{30} = 160 \times 10^{-6}$ (仅暴露于 HCN 气体 30min 后,会导致 50% 死亡率的浓度)

如果 $A = 1$, 大约 50% 的受害者会死亡。

如果 A 为大于 1 的某个数值,则所有的受害者都会死亡。

这个关系式显示在达到 30min LC_{50} 时, CO 和 HCN 的浓度分别为 25%、50% 和 75%。

式(1-11)所采用的方法被称为分数总和法。对于某些火灾,可以采用一个更简单的方法,即只设定一个最大容许浓度。克劳得和缪克^[9]给出了暴露于有毒气体 5min 和 30min 时的致命浓度,见表 1-3。很明显,不同的研究人员给出的数值也会各有不同。

1.4.6 疏散时间

1.4.6.1 行走速度

在不同的环境条件下,人员会有不同的行走速度,例如在建筑物中和地铁站的行走速度就不一样。有研究表明,人在无烟环境中的行走速度在 1.0~2.0m/s 之间。图 1-8 显示了人员分别在非刺激性和刺激性的烟气中的行走速度。

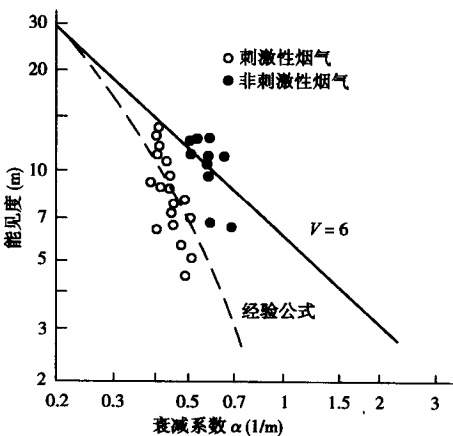


图 1-7 刺激性和非刺激性烟气中反光标志能见度与衰减系数间关系曲线

表 1-3 毒性气体的影响

气 体		假定 LC ₅₀ 值(人类)		参 考 资 料	参考数据(物种,时间) h-人, r-老鼠, m-鼠, p-灵长类, gpg-豚鼠, ham-大鼠, rbt-兔
		5min ($\times 10^{-6}$)	30min ($\times 10^{-6}$)		
CO ₂	二氧化碳	> 150000	> 150000	Levin et al. (1987b)	r
C ₂ H ₄ O	乙醛		> 20000	Sax(1984) ACGIH(1980)	LC(m, 240) = 1500 LC(r, 240) = 4000; LC(ham, 250) = 17000 LC(r, 30) = 20000; LC(r, 420) = 16000
C ₂ H ₄ O ₂	醋酸		11000	Levin et al. (1987b)	LC(m, 60) = 5620
NH ₃	氨气	20000	9000	Sakurai(1988) Nishimaru(1985)	EC(m, 5) = 20000; EC(m, 30) = 4400 EC(r, 5) = 10000; EC(r, 30) = 4000
HCl	氯化氢	16000	3700	Hartzell et al. (1985) Higgins et al. (1972)	r, p LC(r, 5) = 40989
CO	一氧化碳		3000	Levin et al. (1987b) Kimmerle(1974)	LC(r, 30) = 4600; LC(h, 30) = 3000
HBr	溴化氢		3000	Sax(1984)	LC(m, 60) = 814; LC(r, 60) = 2858
NO	一氧化氮	10000	2500	Sax(1984) ACGIH(1980)	毒性相当于 NO ₂ 的 1/5 LC(h, 1) = 15000
COS	碳酰硫		2000	Sax(1984)	LC ₀ (var, 35 - 90) = 1000 ~ 1400
H ₂ S	硫化氢		2500	Sax(1984) Kimmerle(1974)	LC(m, 60) = 673; LC ₀ (h, 30) = 600 LC ₀ (ham, 5) = 800; LC(h, 30) = 2000
HF	氟化氢	10000	2000	Sax(1984) Higgins et al. (1972) Kimmerle(1974)	LC(gpg, 15)4327; LC(p, 60) = 1774 LC ₀ (h, 30) = 50; LC(m, 60) = 456 LC(r, 60) = 1276; LC(r, 5) = 18200 LC(gpg, 2) = 300; LC(m, 5) = 6247 LC(r, 5) = 18200
C ₃ H ₄ N	丙烯腈		2000	Sax(1984)	LC(gpg, 240) = 56; LC(r, 240) = 500
COF ₂	碳酰氟		750	ACGIH(1980)	LC(r, 60) = 360
NO ₂	二氧化氮	5000	500	Sakurai(1988) Nishimaru(1985) ACGIH(1980)	EC(m, 5) = 2500; EC(m, 30) = 700 EC(r, 5) = 5000; EC(r, 30) = 300 LC(m, 5) = 83331; LC(r, 5) = 1880
C ₂ H ₃ O	丙烯醛	750	300	Sax(1984) Kapllan et al. (1984)	LC(m, 360) = 66; LC ₀ (p, 10) = 153 LC(p, 5) = 505 ~ 1025
CH ₂ O	甲醛		250	Sax(1984) Kimmerle(1974) ACGIH(1980)	LC ₀ (r, 240) = 250; LC(r, 30) = 250; LC _j (r, 240) = 830(??) LC(cat, 480) = 700; LC(r, 5) = 700
SO ₂	二氧化硫	500		Sax(1984) Kimmerle(1974)	没有啮齿动物, LC(m, 300) = 6000 LC(var, 5) = 600 - 800
HCN	氰化氢	280	135	Levin et al. (1987b) Higgins et al. (1972) Kimmerle(1974)	LC(r, 5) = 570; LC(r, 30) = 110 LC(r, 5) = 503; LC(m, 5) = 323 LC(h, 30) = 135; LC(h, 5) = 280
C ₉ H ₆ O ₂ N ₂	二硝基甲苯		≈ 100	Sax(1984) Kimmerle(1974)	LC(gpg, 240) = 13; LC(rbt, 180) = 1500 LC(r, 360) = 600; LC(m, 240) = 10 LC(m, r, rbt, gpg, 240) = 9.7 ~ 13.9
COCl ₂	碳酰氯	50	90	Sax(1984) Clayton& Clayton(1982)	rec. 50ppm short exp LC(h, 30) = 90
C ₄ F ₈	全氟化异丁烯	28	6	Sax(1984)	LC(r, 10) = 17; LC(r, 5) = 28

注: EC-影响浓度; LC₀-观察到第一例致命现象的浓度; LC代表 LC₅₀

目前还没有研究数据证实隧道中的行走速度,但是可以根据地假设大约在 $0.5 \sim 1.5 \text{ m/s}$ 之间,具体数值取决于烟气中的能见度、照明以及出口标志的设计。

1.4.6.2 预动时间

正如前文所述,人员行走至安全区的时间必须包括探测和报警时间,以及人员弃车而逃的反应时间,从而判断人员是否有足够的时间安全逃离火场。

探测和报警时间取决于火灾探测器的类型以及火灾信号以什么方式传达至车辆内的人员。在有人值守的隧道内这段时间大概需要 $2 \sim 5 \text{ min}$,但在无人值守的隧道内会长得多。

同样,很难确切估计人员弃车而逃的反应时间,例如大客车的乘客所需的时间要比小客车内的乘客时间长,估计这段时间大概会在 $0.5 \sim 5 \text{ min}$ 之间。

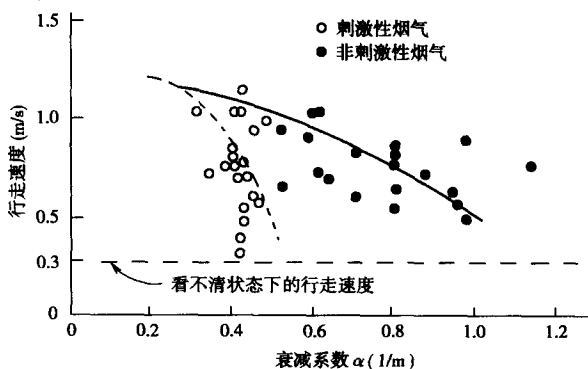


图 1-8 在刺激性和非刺激性烟气中的行走速度

1.5 建议与要求

根据重要程度,隧道火灾及烟气控制目标的顺序应为:

- 尽可能疏散隧道内人员以保障生命安全;
- 保障救援和消防作业条件;
- 避免爆炸;
- 尽可能降低隧道结构、设备以及周围建筑物的破坏程度。

根据各个国家的政策、隧道类型(沉管、市内等)及其运营模式的不同,上述各个目标的重要程度也不一样,特别是保护隧道结构安全的必要性差异很大。

可以对人员疏散过程中和消防作业期间隧道内的生存条件作一个大致的评估。疏散时间可能需要几分钟,主要取决于安全出口的距离和行走速度。人员前往紧急出口的正常行走速度大约为 1.5 m/s ,受烟气的影响也有可能减慢到 1 m/s 甚至 0.5 m/s 。

1.5.1 可忍受辐射量

靠近火源的地方,热辐射同时来自火焰本身和热烟气。在远离火源的地方,则仅来自于高温烟气。热辐射会形成危险环境。

为了保障安全疏散,辐射量必须低于某极限值,即当皮肤裸露几分钟就会感到剧烈疼痛时的辐射水平,一般为 $2 \sim 2.5 \text{ kW/m}^2$ 。消防人员能忍受的极限值为 5 kW/m^2 ,当配戴呼吸器时的操作时间不能超过 30 min 。

1.5.2 可忍受空气温度

为了保障安全疏散,周围环境空气的温度不能高于 80°C ,在此温度下人只能忍受 15 min 。

1.5.3 最低能见度

在烟气环境中,能见度必须在 7 m 以上,人才能平稳地行走。如果要能够看清疏散标志,能见度则必须达到 15 m 。因此为了保障安全疏散和消防作业,最低能见度必须在 $7 \sim 15 \text{ m}$ 之间。

1.5.4 毒性指标

目前还没有一个计算车辆火灾所释放的毒性或刺激性气体浓度的公认方法。所以本文无法给定一个可忍受的极限浓度值。在许多隧道火灾中,只要保证最低能见度,基本上有害气体浓度可以维持在疏



散人员可忍受的极限之内。

1.5.5 混凝土爆裂

混凝土爆裂会妨碍人员疏散,并伤害消防人员。当混凝土表面温度达到 $150^{\circ}\text{C} \sim 200^{\circ}\text{C}$ 时就会开始爆裂。对于没有衬砌而裸露原始围岩的隧道,温度临界值会更低。因为爆裂一般在火灾发生后的几分钟后才开始,所以对逃生人员的影响不会很大,但是会危及消防人员的安全。

1.5.6 设备坠毁

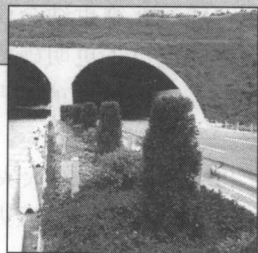
必须保证当隧道内有人时,重型设备不能坠落。这意味着在消防作业期间,温度达到 $400^{\circ}\text{C} \sim 500^{\circ}\text{C}$ 的时候,重型设备不能坠落。在隧道内这个温度可以产生 $5\text{kW}/\text{m}^2$ 的辐射热,是消防人员可忍受的极限值。

1.5.7 设备的耐火能力

在疏散和消防作业期间,隧道内应该有足够数量的风机和其他安全设备能够承受高温,正常运作并控制烟气。

1.6 未来研究方向

上述问题涉及到许多研究领域,仍然需要作进一步的研究,特别是人员疏散模式,同时应该考虑残疾人疏散过程中存在的问题。



2 火灾风险和设计火灾

2.1 介绍

本章主要探讨公路隧道发生火灾的频率和火灾的严酷性。最近的统计结果(2.3节)和火灾试验(2.4节)进一步更新了 PIARC 现有的研究成果。

本章的一个重要目标是确定与下列因素相关的设计火灾:

- 通风系统工程设计(即热量、毒性气体和烟气生成率);
- 培训处理隧道火灾的人员的能力(即消防队员和隧道现场监控人员)。

在选择设计火灾时必须考虑到允许载有危险物品的车辆,如油罐车通行隧道的情况。如本文序言所述,本文不讨论隧道是否允许通行车辆类型的决策方法。PIARC 公路隧道委员会已经建立了专门的工作组来处理这个课题,同时也和经济合作与发展组织(OECD)联合开展了关于“公路隧道危险品运输”的研究项目,研究成果将单独出版。但本文将允许或禁止危险品车辆通行的决定作为设计参数之一,并在此基础之上确定设计火灾,并提出防灾措施建议。

本章也讨论了火灾场景,用于:

- 隧道结构工程设计(例如,增强混凝土设计,弥补水底隧道的结构弱点);
- 建筑构件的火灾试验(例如,防火板),以及隧道设备的火灾试验(例如,射流风机、静电吸尘器、照明、电缆)。

结构耐火性能的进一步研究需要同国际隧道协会(ITA)一起合作,因为 ITA 主要研究解决隧道结构工程方面的问题。

某些国家已经将火灾安全设计原则纳入他们的隧道设计规范之内,还有一些国家也正在准备这么做。很多工作的基础都是 PIARC 公路隧道委员会于 1987 年在布鲁塞尔公布的研究报告^[19]。从那以后又取得了更进一步的研究成果。挪威的尤里卡火灾试验^[20]和美国纪念隧道试验^[22]已经完成,同时法国和西班牙^[23,24]在新建隧道通车之前,进行了控制小客车数量的燃烧试验。

通过流体力学模型试验和 CFD 计算机模拟取得了更多的研究成果。这方面的研究工作还在进行中,因此本章只提供关于火灾风险和设计火灾的一些临时成果。

在编写后面几章的时候,我们发现目前有许多关于隧道火灾的详细报告,但是关于设计火灾必须满足的性能描述(例如,公路隧道内技术设备的耐火性能的测试)实在太少了。因此,PIARC 进一步的工作重点会放在如何确定相关火灾场景,以及如何建立适用于这些场景的设计火灾(例如,以测试为目的或以通风为目的等)。

2.2 PIARC 的前期研究

PIARC 在公路隧道通风方面已经做了非常重要的工作。研究初期主要关注车辆尾气的稀释,从而