

Suidao Ji Wangluo Huozai Zhong De Redongli Xianxiang Yanjiu

隧道及网络火灾中的 热动力现象研究

周 延 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

国家自然科学基金资助项目 (50376070)

隧道及网络火灾中的 热动力现象研究

周 延 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

本书系统地总结了国内外关于隧道火灾的主要研究成果,并对隧道及网络火灾中的多种典型热动力现象的机理进行了探讨。建立了水平隧道火区及排烟段阻力的计算模型;建立了抑制烟气逆流层的临界风速的计算模型。通过实验研究,得出了烟气逆流层长度的实验关联式;发现了两条并联的旁侧支路可以在不同时刻发生风流逆转的特殊流动现象;提出并证明了并联旁侧支路风流逆转次序的判定准则。通过定性分析和计算机模拟,指出了水平隧道网络火灾中作为旁侧支路的非角联支路也可能发生风流逆转。

本书可供矿山安全、安全技术及工程、防灾减灾工程与防护工程、隧道工程及相关领域的科研人员、工程技术人员、研究生和高年级本科生参考使用。

图 书 在 版 编 目 (C I P) 数 据

隧道及网络火灾中的热动力现象研究/周延著. —徐
州:中国矿业大学出版社,2006.10

ISBN 7 - 81107 - 372 - 2

I. 隧… II. 周… III. 隧道—火灾—空气热动力
学—研究 IV. U458.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 127663 号

书 名 隧道及网络火灾中的热动力现象研究

著 者 周 延

责任编辑 张怡菲

责任校对 杜锦芝

出版发行 中国矿业大学出版社

(江苏省徐州市中国矿业大学内 邮编 221008)

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

排 版 中国矿业大学出版社排版中心

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

经 销 新华书店

开 本 787×1092 1/16 印张 7.25 字数 200 千字

版次印次 2006 年 10 月第 1 版 2006 年 10 月第 1 次印刷

印 数 1~2000 册

定 价 30.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

序

随着社会经济的发展及生产活动空间的拓展,各类隧道越来越多地出现在许多生产生活领域之中,随之也不可避免地带来了隧道火灾风险。在最近几十年里,世界上许多国家都发生过严重的隧道火灾事故,造成了众多的人员伤亡和巨大的财产损失。

由于隧道及隧道网络在结构上的特殊性,使隧道火灾在许多方面呈现出不同于一般建筑火灾的特点。火灾所产生的热动力会严重干扰隧道及隧道网络的通风状态,甚至导致通风紊乱,使火灾烟气流动失去有效的控制,造成更严重的灾难后果。加深对隧道及网络火灾中各种热动力现象的形成机理和发展规律的认识,是提高隧道火灾安全水平的重要基础,同时也是一个极具挑战性的难题。

本书是国内迄今所见的第一部专门研究隧道及隧道网络火灾中的热动力现象的学术专著。作者在系统总结国内外关于隧道火灾的主要研究成果的基础上,对隧道火灾中的烟窗效应、节流效应、烟气逆流层、着火隧道及旁侧支路风流逆转等多种典型的热动力现象的机理进行了探讨。对火区阻力的成因进行了深入分析,指出了火区阻力应包括粘性摩擦阻力和加速阻力两个部分,在此基础上建立了水平隧道火区阻力的计算模型,并通过试算说明了加速阻力确实是火区阻力的重要组成部分;在 Kunsch 模型的基础上,对生成烟气逆流层的临界状态进行了严格的定义,并建立了一个新的抑制烟气逆流层的临界风速的计算模型;通过隧道火灾模型实验研究了烟气逆流层长度的变化规律,并将所得实验数据与其他研究者所得到的同类实验数据进行了综合关联分析,得出了一个较理想的烟气逆流层长度的实验关联式;应用隧道一维非稳态流动模型对上行通风火灾旁侧支路风流逆转现象进行了理论分析和计算机模拟,发现了两条并联的旁侧支路可以在不同时刻发生风流逆转的特殊流动现象;提出了并联旁侧支路风流逆转次序的判定准则,并给出了严格的数学证明。本书大部分内容是在作者完成的科研项目研究成果的基础上编写的。这些创新性成果的取得,对促进隧道及网络火灾理论的完善和发展具有重要的理论和实践意义。

当然,新的学术观点的提出和最终确立,必须要经过理论和实践的反复锤炼。在本书即将出版之际,特向广大同行推荐,并请予以指正。



2006 年 10 月

前 言

隧道的用途决定了隧道中不可能完全消除火灾荷载,因此隧道中必然存在发生火灾的危险。由于隧道是一种狭长的受限空间,与外界连通的开口少,一旦发生火灾,极易产生大量的高温浓烟,且烟气不易排出,造成人员疏散和灭火救援都极为困难。因此,在隧道火灾的扑救过程中,控制火灾烟气和控制火势是同等重要的。不能有效地控制烟气,消防队员就难以接近火场,也就不能有效地控制火势。

在隧道火灾过程中,火灾烟气的流动不但受机械(人工)通风的影响,还受火灾所产生的热动力的影响。在火灾热动力的驱动下,隧道内往往会出现诸如烟囱效应、节流效应、烟气逆流层甚至风流逆转等热动力现象。在隧道网络中还会出现旁侧支路风流逆转的现象。在这些火灾热动力现象中,烟囱效应和节流效应通常表现为隧道通风的增强或减弱,而烟气逆流层和风流逆转的发生往往就意味着烟侵范围的扩大,疏散和救援路线的丧失。

毫无疑问,深入认识隧道及网络火灾中的热动力现象的发生机理和发展规律是实施有效的火灾烟气控制的前提,也是提高火灾救援的效率和安全性的前提。为了加深对隧道火灾发生及发展规律的认识,许多国家投入了大量的人力、物力和财力对隧道火灾开展了专门的研究。其中著名的有 20 世纪 90 年代初欧洲 9 国联合开展的 EUREKA 计划,美国开展的 Memorial 计划等大规模的隧道火灾实验。此外,为数众多的研究者从实验研究、理论模型的建立(计算机模拟)等各个方面对隧道火灾及火灾中的热动力现象进行了大量的研究。本书的成书目的之一就是要对这些研究工作进行系统的总结和分析,使读者能够比较全面地把握当前隧道火灾研究的基本现状和主要成果。本书的成书目的之二则是试图从理论分析、模型建立等方面进一步深化隧道及网络火灾中的热动力现象的研究。

全书可分为两部分。

第一部分为第 1 至 3 章。其中,第 1 章对隧道火灾的基本特点、火灾热动力现象的形式和特征、隧道通风方式及其火灾安全特性进行了概述,并简要介绍了本书的主要内容。第 2 章介绍了过去几十年欧美等国所进行的隧道火灾实验,对所取得的实验成果进行了总结分析;讨论了隧道火灾过程理论模型,包括经验模型、区域模型、场模型、网络模型及其适用范围。第 3 章重点介绍了隧道火灾的燃烧模型、隧道火灾火羽流特性以及隧道火灾的蔓延特性。

第二部分为第 4 至 6 章。其中,第 4 章重点研究了隧道火区及排烟段阻力的计算模型。对火区阻力的成因进行了深入分析,指出了火区阻力应包括粘性摩擦阻力和加速阻力两个部分,在此基础上建立了水平隧道火区阻力的计算模型,并通过试算说明了加速阻力确实是火区阻力的重要组成部分;讨论了排烟段阻力计算以及烟囱效应和局部火风压计算的问题。第 5 章重点研究了有关烟气逆流层的临界风速和逆流层长度的问题。在 Kunsch 模型的基础上,对生成烟气逆流层的临界状态进行了严格的定义,并建立了一个新的抑制烟气逆流层的临界风速的计算模型;通过隧道火灾模型实验研究了烟气逆流层长度的变化规律,并将所

得实验数据与其他研究者所得到的同类实验数据进行了综合关联分析,得出了一个较理想的烟气逆流层长度的实验关联式。第6章研究了隧道网络火灾中的旁侧支路风流逆转的问题。应用隧道一维非稳态流动模型对上行通风火灾旁侧支路风流逆转现象进行了理论分析和计算机模拟,发现了两条并联的旁侧支路可以在不同时刻发生风流逆转的特殊流动现象;提出了并联旁侧支路风流逆转次序的判定准则,并给出了严格的数学证明;通过定性分析和计算机模拟,对水平隧道网络火灾中非角联分支的风流逆转现象进行了研究。

以上内容基本涵盖了作者近十年来在隧道火灾热动力现象研究方面所做的主要工作。其中提出的一些新的现象和学术观点还有待于在今后的工作中不断加以检验和完善,作者也乐于就这方面的问题与读者们共同研讨,并听取大家的批评和建议。

在本书完稿之际,作者要衷心感谢导师王省身教授,感谢他在十年前引领作者进入了隧道火灾这一研究领域以及多年来的悉心指导;感谢英国 ULSTER 大学的 Vasily Novozhilov 教授提供的宝贵资料和建设性的合作;感谢中国矿业大学安全工程学科的各位老师和同事的合作和支持;感谢中国矿业大学出版社对本书的出版所给予的支持;感谢国家自然科学基金会给予的研究经费支持;感谢作者的父母和岳父岳母对作者的关怀以及爱人孟倩女士对作者长期的关心和照顾;最后,还要感谢作者的儿子周祉煜小朋友,感谢他使作者在繁忙的工作之余所体验到的不可替代的天伦之乐!

作者

2006 年 8 月

主要符号表

A_F	火源面积, m^2	$\dot{m}_i$	燃料消耗速率, kg/s
a_{ij}	分支 i 与回路 j 的关联函数	N	网络的分支数
b	羽流半径, m		千摩流量, $kmol/s$
c	比热容, $kJ/(kg \cdot K)$	p	压力, Pa
c_p	比定压热容, $kJ/(kg \cdot K)$	Δp	压力差, Pa
D	特征长度, m	Q	体积流量, m^3/s
	火源的当量直径, m	Q_m	质量流量, kg/s
D_{ik}	分支 i 与节点 k 的关联函数	$\dot{Q}$	释热速率, kW
d	隧道当量直径, m	$\dot{Q}_c$	对流释热速率, kW
Fr	Froude 数	$\dot{q}''$	燃料表面的热流密度, kW/m^2
Fr_m	修正的 Froude 数	q_v	单位体积烟流与隧道壁面的热交换速率, kW/m^3
g	重力加速度, m/s^2	q_c	单位体积烟流获得的燃烧热, kW/m^3 ;
H	隧道高度, m		$kg m^{-7}$
	压力差, Pa	R	隧道的当量半径, m
H_B	浮力作用范围的特征高度, m		基于体积流量的隧道风阻,
H_c	燃烧热, kJ/kg		$kg m^{-7}$
H_d	火源距隧道顶板的垂直距离, m		通用气体常数, $kJ/(kg \cdot K)$
H_f	火焰高度, m	Re	Reynolds 数
h	通风阻力, Pa	Ri	Richardson 数
	沿顶板形成的烟气层厚度, m	R_m	基于质量流量的隧道风阻,
h_v	通风机工作压力, Pa		$(kg \cdot m)^{-1}$
h_f	局部火风压, Pa	R_F	单位空间内燃料消耗速率,
J	网络中的独立回路数		$kg/(m^3 \cdot s)$
k	湍流动能, m^2/s^2	r	氧与燃料的化学当量质量比
	导热系数, $kW/(m \cdot K)$	S	隧道横截面积, m^2
L	隧道长度, m	T	温度, K
	顶板下最高温度点距火源中心的距离, m	ΔT	温度差, K
L_b	烟气逆流层长度, m	T_{ig}	燃料的燃点, K
l	模型与原型的特征尺度比	t	时间, s
M	网络的节点数	U	隧道横截面的周长, m
	千摩尔质量, $kg/kmol$	u	速度, m/s

u_a	风速, m/s				燃料厚度, 热穿透深度, m
u_c	临界风速, m/s	ε			湍流动能耗散率, m^2/s^3
V	速度, m/s	ϕ			燃料与氧气的当量质量比
	火焰蔓延速度, m/s	γ			绝热指数
W	隧道宽度, m	λ			Darcy 摩擦因子
x	沿隧道轴向坐标, m	μ			动力粘性系数, $kg/(m \cdot s)$
Y	质量分数	ν			运动粘性系数, m^2/s
Z	混合分数	θ			火焰倾角, Deg
z_v	虚点源与火源间的垂直距离, m	ρ			密度, kg/m^3
α	隧道倾角	$\Delta\rho$			密度差, kg/m^3
	卷吸系数	ξ			并联旁侧支路风流逆转次序判定 准则
	热交换系数, $kW/(m^2 \cdot K)$				
β	Shvab-Zeldovic 函数	φ			摩尔分数
δ	隧道壁面粗糙度, m				体积分
上标					
*	无量纲	"			基于 Favre 平均的脉动值
'	基于 Reynolds 平均的脉动值				
下标					
0	起始	d			折返烟气层
	火灾发生之前	F			燃料
	隧道入风流				火区
	羽流轴线	M			模型
1	燃料流	max			最大值
	始点	min			最小值
2	氧流	m			质量
	末点	O			氧
a	风流	P			原型
	周围环境				羽流
b	烟气逆流层				燃烧产物
c	临界	S			化学当量
	对流	W			隧道壁面
	燃烧	∞			静止环境

目 录

主要符号表	I
1 绪论	1
1.1 隧道火灾概述	1
1.1.1 国内外典型隧道火灾事故案例简介	1
1.1.2 隧道火灾的特点	2
1.2 隧道火灾中几种重要的热动力现象	3
1.2.1 烟囱效应	3
1.2.2 节流效应	4
1.2.3 烟气逆流层(烟流滚退)	4
1.2.4 着火隧道的风流逆转	4
1.2.5 旁侧支路的风流逆转	5
1.3 隧道机械通风方式及其火灾安全特性	5
1.3.1 隧道机械通风方式	6
1.3.2 隧道机械通风系统的火灾安全特性	8
1.4 本书的主要内容	8
2 隧道火灾实验及理论基础	10
2.1 隧道火灾的实验研究	10
2.1.1 隧道火灾模拟实验中的相似性问题	10
2.1.2 隧道火灾小尺度模型实验	11
2.1.3 隧道火灾大尺度实验	14
2.2 隧道火灾过程的理论模型	17
2.2.1 隧道火灾的经验模型	17
2.2.2 隧道火灾的区域模型	20
2.2.3 隧道火灾的场模型	23
2.2.4 隧道火灾的网络模型	28
3 隧道火灾的燃烧特性	32
3.1 隧道火灾燃烧模型	32
3.1.1 混合分数模型	32
3.1.2 涡破碎(EBU)模型	34

3.2	隧道火灾中的火羽流特性	36
3.2.1	静止环境中的火羽流	36
3.2.2	纵向通风隧道中的火羽流	41
3.3	隧道火灾蔓延特性	44
3.3.1	火灾的连续蔓延	44
3.3.2	火灾的跳跃式蔓延	45
4	隧道火灾热动力分析	47
4.1	水平隧道火区的阻力特性	47
4.1.1	火区通风阻力的构成	47
4.1.2	火灾阻力分析的几个基本假设	48
4.1.3	火区通风阻力的计算模型	49
4.1.4	火区的阻力特性分析小节	53
4.2	隧道火灾排烟段的热动力特性分析	54
4.2.1	冷抽力的物理机制	54
4.2.2	水平排烟段阻力计算模型	55
4.2.3	倾斜排烟段中的烟囱效应和局部火风压	57
5	隧道火灾中的烟气逆流层	59
5.1	烟流逆流层形成机理的定性分析	59
5.2	水平隧道烟流逆流层的形成条件	60
5.3	临界风速计算模型	61
5.3.1	临界风速计算的 Kunsch 模型	62
5.3.2	关于 Kunsch 模型的修正和讨论	65
5.3.3	一个新的临界风速计算模型	66
5.4	水平隧道烟气逆流层的长度的实验研究	69
5.4.1	实验系统	69
5.4.2	实验结果的处理和分析	70
5.4.3	与其他实验数据的对比和综合关联分析	73
5.4.4	小节	74
6	网络火灾中旁侧支路的风流逆转	75
6.1	上行通风火灾旁侧支路风流逆转	75
6.1.1	上行通风火灾旁侧支路风流逆转的静态分析	76
6.1.2	上行通风火灾旁侧支路风流逆转的动态分析	77
6.1.3	动态分析与静态分析的比较	80
6.2	上行通风火灾旁侧支路风流逆转的计算机模拟	81
6.2.1	火源燃烧模型	81
6.2.2	旁侧支路风流逆转过程模拟	82

6.2.3 并联旁侧支路风流逆转次序模拟	84
6.3 并联旁侧支路风流逆转次序的判定准则	86
6.3.1 判定准则的证明	86
6.3.2 判定准则的物理意义	91
6.4 水平网络火灾中的旁侧支路风流逆转	91
6.4.1 定性分析	92
6.4.2 计算机模拟分析	92
参考文献	94

1 绪论

1.1 隧道火灾概述

随着社会经济的发展及生产活动空间的拓展,各种类型的隧道广泛地存在于许多生产生活领域。其中既包括交通运输中作为咽喉要道的公路、铁路隧道,也包括许多大、中型城市中作为重要公共交通设施的地铁隧道,还包括地下矿物资源开采过程中所普遍采用的矿山隧道。其中,有的隧道是独立存在的(如大多数的公路、铁路隧道),而有的则是多条隧道(在矿山中可达数百条之多)相互联结,形成隧道网络;有的隧道是平的,有的隧道是倾斜的;有的靠自然通风,有的靠机械通风。

隧道的用途决定了在隧道中不可能完全消除可燃物(火灾荷载),因此隧道中必然会存在火灾风险,尤其是在长距离的交通隧道和处于地下数百米深的矿山隧道之中。历史上曾发生过许多严重的隧道火灾事故,造成了重大的人员伤亡和巨大财产损失,也充分说明了隧道火灾的巨大威胁。

1.1.1 国内外典型隧道火灾事故案例简介

由于隧道(或隧道段)是一种狭长的受限空间,与外界连通的开口少,许多隧道只有一个入口和一个出口,一旦发生火灾,热量和烟气难以及时排出,且火场两侧均有可能受到高温烟气的侵袭,导致扑救和逃生都极为困难。事实也证明,在群死群伤的隧道火灾中多数受害者是因为吸入烟气窒息而死的。

由于隧道的用途、火灾荷载的种类不同,导致隧道火灾的原因也有所不同。对于大多数交通隧道而言,车辆等交通工具火灾是导致隧道火灾的首要原因;对于矿山隧道而言,运输机胶带和可燃支护材料燃烧通常是最大的火灾威胁。

下面仅举几起典型的隧道火灾案例加以简要介绍^[1~4]。

(1) 1979年日本烧津隧道火灾

1979年7月11日,日本静冈至烧津间2050 m长的隧道下行线内,距烧津出口侧400 m处,因车辆碰撞引起火灾,并造成大量车辆堵塞,堵塞的车辆中有不少装载着化学危险品,许多驾驶员弃车而逃。火灾迅速蔓延,消防队员到达现场后,由于浓烟,不能展开直接有效的灭火,火灾一直持续到7月18日才熄灭。此次火灾共导致7人死亡,2人受伤,189台车辆被烧毁。由于长时间高温炙烤,使隧道内顶部崩裂脱落1000余米。

(2) 1987年中国陇海线十里山隧道火灾

1987年8月23日,由兰州站发出的1818次货物列车在穿越陇海线十里山二号隧道时脱轨颠覆,16个油罐车在隧道内起火,烈火燃烧了一昼夜,使陇海线天兰段中断行车201小时56分,3名押运人员死亡,报废货车23辆,隧道裂损179 m,损坏线路763 m,直接经济损失240万元。

(3) 1995 年阿塞拜疆巴库地铁火灾

1995 年 10 月 28 日,阿塞拜疆首都巴库地铁因电动机车电路故障引起火灾。由于地铁车厢大部分材料采用易燃物质,火势异常猛烈,有毒浓烟弥漫,地铁司机把列车停在了隧道内,被困乘客纷纷打碎车窗玻璃夺路而逃,在浓烟中乱成一团。大火直到第二天凌晨才被扑灭。这场火灾造成约 300 人死亡,其中有 3 名消防队员,另有 269 人受伤。据调查,死亡的乘客中大多数不是被烧死,而是中毒、窒息而死。

(4) 1999 年勃朗峰(Mont Blanc)隧道火灾

1999 年 3 月 24 日,一辆载有 12 t 面粉和 9 t 奶油的比利时卡车从意大利一侧进入法国、意大利之间的勃朗峰(Mont Blanc)隧道,在隧道中部起火,火势迅速发展并延烧至其他车辆。造成 39 人死亡,烧毁车辆 37 辆(包括 2 辆消防车);隧道内部烧毁 1 200 m,隧道关闭 3 年。

(5) 1999 年奥地利托恩隧道(Tauern Tunnel)火灾

1999 年 5 月 29 日,奥地利托恩隧道(Tauern Tunnel),因隧道维修一个车道被关闭,另一车道双向通行,由交通灯控制。一辆卡车撞入在北侧路口等待的车队并引起火灾,30 min 后发生轰燃。这次事故造成 12 人死亡(8 人死于车祸,4 人死于火灾,其中 1 人在火场南侧 100 m 处因吸入烟气窒息而死),47 人受伤;24 辆汽车、16 辆卡车被烧毁;隧道损坏 1 000 m,关闭 3 个月。

(6) 2000 年奥地利基茨施坦霍恩山(Mt. Kitzsteinhorn)缆车隧道火灾

2000 年 11 月 11 日,在奥地利基茨施坦霍恩山上,一列登山缆车在自下而上穿越长 3.2 km、倾角达 45°的缆车隧道过程中,暖风机因过热起火,火焰遇到一处断裂的液压管,引起大火。大火产生的浓烟在隧道内以 150 m/h 的速度向上扩散,造成 155 人窒息而死。

(7) 2001 年瑞士圣哥达(St. Gotthard)隧道火灾

2001 年 10 月 24 日,瑞士圣哥达(St. Gotthard)隧道,两辆卡车对撞起火。火灾高温超过 1 000℃,消防救援车无法驶入。待火灾发生 24 小时后,消防车才得以进入火灾现场,此时卡车已融化成一堆废铁。火灾当天证明死亡 10 人,128 人失踪,估计被浓烟熏死的被困者达数十人;隧道有 300 m 的路段顶部坍塌。

(8) 1990 年鸡西小恒山煤矿火灾

1990 年 5 月 8 日,小恒山煤矿改扩建皮带井二段皮带过程中,电气焊作业火花引燃散落的皮带碎末,由于初期灭火失败,导致运输机胶带起火,火势迅速发展,并引起风流紊乱。在这起火灾中死亡 80 人(其中包括救灾指挥的矿总工程师、机电副总工程师和 9 名救护队员),伤 23 人。

1.1.2 隧道火灾的特点

由于隧道的特殊结构和用途,隧道火灾往往会表现出一些不同于其他类型火灾的特点。由实际发生的火灾案例也可以看出,这些特点主要包括以下几个方面。

(1) 隧道火灾中热量不易排除,容易形成高温。在大型火灾中,隧道内的温度在 5 min 之内就会快速上升至 1 000℃以上;当载有汽油的油罐车起火时,隧道内的温度可以达到 1 350℃^[5,6]。如此的高温使消防队员根本无法接近火场实施有效的灭火。

(2) 隧道火灾中燃料会接受更多的热量反馈,进而导致火灾蔓延加速;一些在开放空间

中不易燃烧的材料,在隧道火灾中也会发生剧烈燃烧^[16]。

(3) 隧道火灾烟气产生量大、浓度高、毒性大。在隧道火灾中,由于氧气供应不足,往往导致富燃料燃烧,产生大量的有毒烟气。

(4) 火灾产生的浓烟有时会向隧道进、出口方向同时扩散,阻断疏散、救援通道。对处于自然通风状态下的水平隧道,火灾烟气开始会沿隧道的顶板向两个方向同时流动,随着流动距离的增大烟气将弥漫整个隧道断面;对于处于自然通风状态下的倾斜隧道,大部分烟气会在浮力的作用下向较高一侧流动,当隧道倾角不太大时仍会有烟气侵入较低的一侧;对于采用强制纵向通风的隧道,当通风风速较小时也会有一部分烟气向火源上风侧流动。

(5) 隧道火灾扑救、逃生困难。由于隧道结构狭长、光照不良,加之火灾所产生的高温和浓烟极易对有限的救援和疏散路线构成威胁,导致救援人员无法接近火场实施有效的救援。停在隧道内的车辆也极易阻塞救援、疏散通道。受困人员在得不到救助的情况下,在黑暗中极易产生慌乱,疏散非常困难,容易导致群死群伤。

(6) 当火灾发生在隧道网络中时情况将更加复杂。火灾及高温烟气对隧道通风产生剧烈干扰,使隧道网络的通风状态发生变化,甚至引起风流紊乱,使烟侵范围扩大,造成灾难性后果^[7]。

由隧道火灾的上述特点可以看出,隧道火灾所产生的高温和浓烟是妨碍火灾救援、导致人员伤亡的主要原因。研究高温烟气在隧道内流动过程中所产生的各种热动力现象,是实施有效的烟气控制的前提,对火灾救援和人员疏散都具有重要的意义。

1.2 隧道火灾中几种重要的热动力现象

在隧道火灾过程中,火焰和高温烟气所引起热动力会对隧道内的气流结构产生重要的影响。在有强制纵向通风的隧道中,热动力的影响有时与强制通风作用相同,有时与强制通风作用相反。在不同类型热动力的作用下会引起不同的热动力现象。其中,比较重要的热动力现象或效应主要包括烟囱效应、节流效应、烟气逆流层(烟流滚退)、着火隧道的风流逆转、旁侧支路的风流逆转等。

1.2.1 烟囱效应

当一条处于自然通风状态的倾斜隧道中发生火灾时,浮力的作用促使高温烟气向高处流动,从而使隧道内的气体运动得到加强,这就是烟囱效应。与浮力的物理机制相对应,烟囱效应仅依赖于隧道的标高变化和隧道内外的密度差。对采用强制纵向通风的隧道,烟囱效应有时表现为气流运动加强(强制上行通风时),有时表现为气流运动减弱(强制下行通风时)。对采用强制下行通风的倾斜隧道,由于浮力与强制通风的作用方向相反,隧道中的气流会出现停滞甚至逆转。

总之,无论是对自然通风还是机械通风的隧道,烟囱效应都可定义为烟气通过倾斜隧道或竖井时,在浮力作用下产生向上加速的趋势。在矿井火灾学中所定义的局部火风压实际就是导致烟囱效应的浮力(或浮力压头)。

1.2.2 节流效应

当有纵向强制通风的隧道内发生火灾时,隧道的进风量有时会随火势的加强而减小,这种现象称为节流效应。一般认为节流效应是由火区阻力造成的。在上行通风的倾斜隧道中,节流效应与烟囱效应将相互抵消,从而使隧道的进风量有时表现为增大,有时表现为减小。在下行通风的隧道中,节流效应与烟囱效应的作用相同,都使隧道的进风趋于减弱。但从本质上讲,节流效应与通风方向并没有直接的关系,它总是表现为使隧道的进风趋于减弱。

1.2.3 烟气逆流层(烟流滚退)

当有纵向强制通风的隧道内发生火灾时,在大部分烟气与风流一起向火区下风侧流动的同时,有一部分烟气会沿隧道顶板做逆风流动,这就形成了烟气逆流层(烟流滚退)。如图 1-1 所示,在火源的上风侧,隧道断面的上部是逆风流动的烟流,下部仍有风流流向火源。烟气逆流层的形成会对在火源上风侧进行灭火的人员构成威胁,当逆流层很厚时就会阻断火源上风侧的救援、疏散通道。烟气逆流层通常可以通过增大风速的方法加以消除,能够恰好消除烟气逆流层的风速称为临界风速。

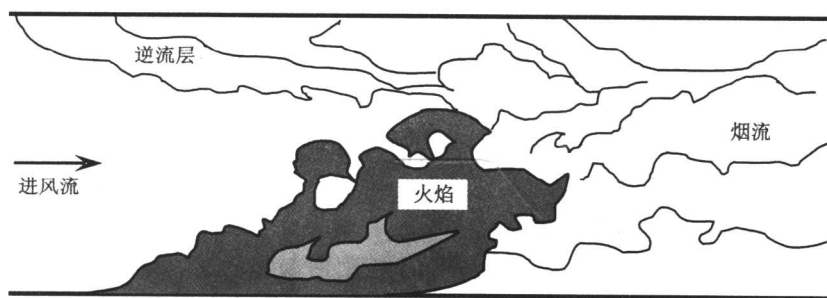


图 1-1 烟气逆流层示意图

1.2.4 着火隧道的风流逆转

对于采用下行强制通风的隧道,一方面很容易在火源的上风侧形成烟气逆流层,另一方面在浮力的作用下整个隧道的气流方向都可能发生改变,这就是着火隧道的风流逆转。着火隧道发生风流逆转后,原来的进风路线变成的排烟路线,而原来的排烟路线则变成了进风路线,从而使原来的上风侧受到烟气侵袭。当着火隧道是隧道网络中的一个分支时,风流逆转发生后的一个主要危害就是可能导致火灾烟气侵入隧道网络的进风区域,进而在更多的网络分支遭到烟流的侵袭。如图 1-2(a)所示的隧道通风网络,节点 2 的标高比节点 3 高,则隧道分支 a、b 和 c 组成的通风网络中的风流是下行的。假设隧道 b 中发生火灾,在火灾初期火势不大时火灾烟气将随风下行流向节点 3。当火势发展到一定程度,高温烟气充满较长的隧道段时,在火源至节点 3 之间的隧道段内就可能形成足够强的局部火风压,在此局部火风压的作用下,分支 b 中会发生风流逆转,其中的气流方向由原来的 2→火源→3 转变为 3→火源→2,如图 1-2(b)所示。显然,在这种情况下分支 a 和 c 就有可能遭受烟流的侵袭。

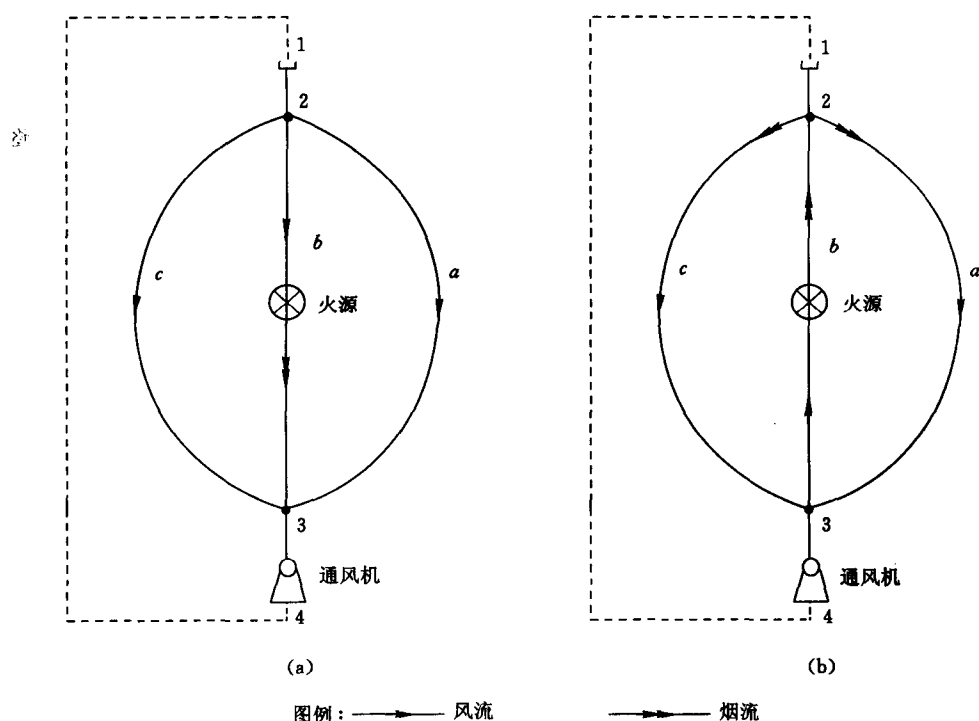


图 1-2 下行通风网络示意图

1.2.5 旁侧支路的风流逆转

旁侧支路的风流逆转是上行通风火灾中最常见的风流紊乱形式。如图 1-3(a)所示的通风网络,节点 2 的标高比节点 5 低,则隧道分支 a 、 b 和 c 组成的通风网络中的风流是上行的。当分支 a 中发生火灾时,在局部火风压的作用下,分支 a 的进风量将趋于增大,而与分支 a 并联的旁侧支路 b 和 c 中的风量将趋于减小。如果在火源至节点 4 之间所形成的局部火风压足够大,分支 b 中的风向就可能发生变化,即由原来的 $3 \rightarrow 4$ 变为 $4 \rightarrow 3$,如图 1-3(b)所示,这种现象称为旁侧支路的风流逆转。显然分支 b 中发生风流逆转后,烟流将进入分支 b ,并可能通过分支 b 再进入分支 a 中火源的上风侧。如此,分支 a 和 b 将全部受到烟流侵袭。

1.3 隧道机械通风方式及其火灾安全特性

隧道内一旦发生火灾,人们所面临的最重要的问题就是如何保证由隧道外部通向火场的救援和避难路线不受高温浓烟的污染,或将受污染的程度(可用隧道内的温度、烟气浓度等参数衡量)控制在一定范围之内,以使消防人员能实施有效的灭火和救援,使被困人员能安全脱险。

Eisner 和 Smith^[8]的研究表明,灭火消防队员必须在距火场不超过 11~14 m 处才能实施有效的灭火。诚然,Eisner 和 Smith 的结论是在 50 年前得出的,与 50 年前相比,如今的

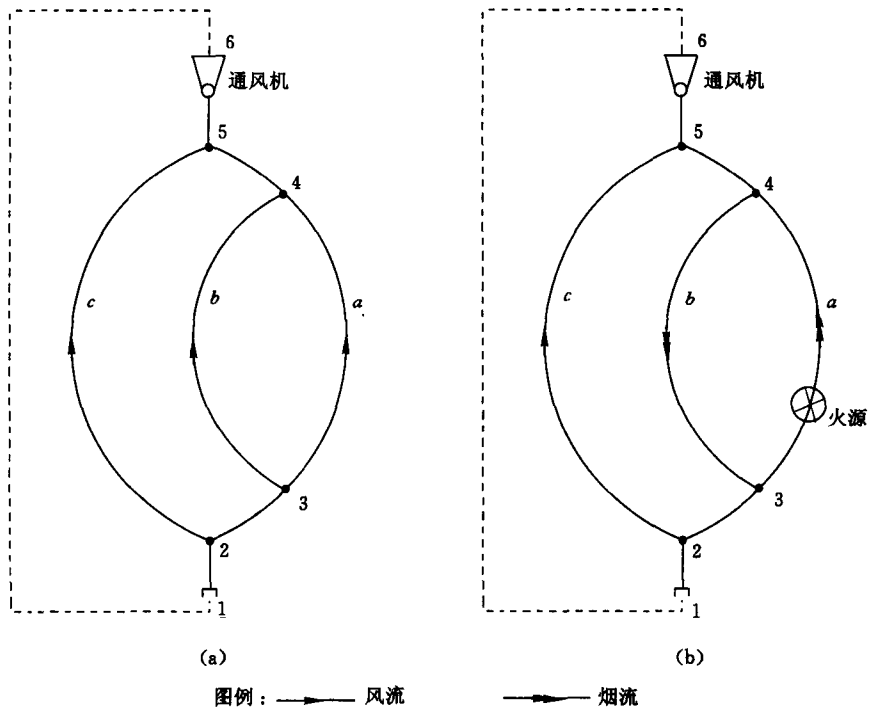


图 1-3 上行通风网络示意图

灭火装备和防护装备性能都有了很大的提高,但受到隧道空间的限制,仍需尽可能地接近火场才能实施有效的灭火。为了既使消防人员能够尽可能地接近火场,又能保证其人身安全,除了配备必要的防护装备(如氧气呼吸器,高温防护服等)之外,另一项重要的技术手段就是采用强制通风控制烟气流动,使消防队员能够从火源的上风侧接近火场,并协助受困人员从上风侧疏散。这就要求为隧道装备机械通风系统。

事实上,对于长距离的交通隧道,为了保证隧道内基本的气候条件,通常也需要装备机械通风系统。对矿山隧道网络而言,装备长期运行的机械通风系统则更是矿山安全生产所必须的。

1.3.1 隧道机械通风方式

对长距离隧道,为保证隧道内的环境卫生,一般都需采用机械的方式对隧道进行通风,排出车辆所产生的废气;从火灾安全的角度考虑,也需要为隧道装备适当的机械通风系统,以满足火灾期间排烟、排热的需要,保障救援和疏散路线不受火灾和高温烟流的威胁。对于公路及铁路交通隧道,根据机械风在隧道内的流动方向可以将隧道机械通风的方式划分为3种基本类型^[9,10]:

(1) 纵向式

机械风沿着隧道纵向流动,其最简单的方式是新鲜空气从靠近隧道一端的风道吹入隧道,将污浊空气从隧道的另一端排出,这种方式又可细分为洞口帘幕式,无帘幕吹入式,竖井(或斜井)吸出式,竖井分段吸出式,分别如图 1-4(a)、(b)、(c)、(d)所示。此外,还有将通风