

高海拔特长铁路隧道 火灾燃烧特性与 防灾救援技术

张念 韩大千 ■ 著

9.1
4

中国建筑工业出版社

高海拔特长铁路隧道 火灾燃烧特性与防灾救援技术

张 念 韩大千 著

中国建筑工程工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

高海拔特长铁路隧道火灾燃烧特性与防灾救援技术/张念, 韩大千著. — 北京: 中国建筑工业出版社, 2013. 9
ISBN 978-7-112-15658-0

I. ①高… II. ①张…②韩… III. ①高纬度地区-铁路隧道-特长隧道-火灾-燃烧-特性-研究②高纬度地区-铁路隧道-特长隧道-防火-研究 IV. ①U459.1②U458

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 169492 号

本书以实际工程为背景, 在深入调查国内外文献资料的基础上, 采用实地调研、现场实测、理论分析、火灾模型试验和数值模拟相结合的方法, 对高海拔特长铁路隧道火灾燃烧特性和防灾救援技术进行了深入系统的研究。主要包括: 研究背景及意义; 高海拔对火灾燃烧特性的影响试验研究; 高海拔隧道火灾燃烧特性现场试验研究; 高海拔特长铁路隧道火灾燃烧特性数值模拟研究; 高海拔特长铁路隧道火灾安全疏散及救援模式研究; 高海拔特长铁路隧道防灾救援系统设计研究; 通过研究所得结论。

本书是关于高海拔特长铁路隧道火灾燃烧特性与防灾救援技术的研究专著, 可供从事隧道及地下工程等防火和防灾设计、施工、科研技术人员以及高等院校广大师生参考。

责任编辑: 辛海丽

责任设计: 张 虹

责任校对: 肖 剑 党 蕾

高海拔特长铁路隧道
火灾燃烧特性与防灾救援技术

张 念 韩大千 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

北京市书林印刷有限公司印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 8 $\frac{1}{4}$ 字数: 200 千字

2013 年 10 月第一版 2013 年 10 月第一次印刷

定价: 26.00 元

ISBN 978-7-112-15658-0

(24284)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

由于我国多山区的地形特点,我国铁路网上分布着大量的铁路隧道。随着铁路建设工程的发展,长隧道的规模和数量也日益增多,其中 3km 以上的铁路隧道就有近 200 座,这一系列长大隧道的修建也带来了长大隧道铁路运行安全问题的出现。特长铁路隧道由于其长度较大,隧道内发生火灾时列车很难在安全时间内驶出洞外,对人员的生命安全和隧道结构都会造成极大的威胁。因此,在我国长大铁路隧道修建的背景下,如何保证隧道的安全性是一个非常重要的问题。

青藏铁路线的修建又将我国铁路隧道修建的海拔高度提到了前所未有的高度。大量高海拔地区的铁路隧道的修建,例如:风火山隧道(平均海拔 4900m),祁连山隧道(平均海拔 4000m),关角隧道(平均海拔 3300m),这些高海拔铁路隧道的修建,不但对隧道修建技术提出了新的挑战,同时对于隧道的防灾救援设计也提出了新的问题。

尽管目前国内外对于特长隧道防灾救援设计和防灾救援技术进行了一定的研究,得出了一定的结论,并且已应用于实际工程中,但对于海拔高度超过 3000m 的特长铁路隧道,还没有开展过类似的防灾救援技术研究。在高海拔情况下,对于隧道火灾的防灾救援存在两个重要难题:一是空气浮力小,隧道内火灾温度场分布和扩散规律、烟雾场分布和扩散规律将不同于一般隧道;二是高海拔隧道空气稀薄,含氧量低、气压低、气温低,在这一地区,人的活动量(逃生速度)受到极大限制,隧道火灾时人员的安全疏散受到极大挑战。因此,高海拔特长铁路隧道火灾的燃烧特性和防灾救援设计不同于一般铁路隧道。

在讲求以人为本的前提下,一切均要以保证人员的安全为主要目标,因此对于高海拔特长铁路隧道来讲,其防灾救援的设计也要以保证人员的安全为首要考虑。隧道火灾安全疏散理论认为:隧道火灾情况下的安全疏散要求着火隧道内人员要在火灾发展到威胁人员安全状况之前到达安全区域,也就是说人员的必需安全疏散时间(RSET)要小于危险状况的来临时间(也即隧道火灾人员可用于安全疏散的时间 ASET)。即:要保证 $RSET < ASET$,从而保证隧道火灾条件下人员的安全。要想真正掌握高海拔隧道内火灾人员可用安全疏散时间以保证人员的安全疏散,就必须从人员安全疏散的角度出发,结合实际情况对高海拔隧道内火灾的燃烧特性进行系统的分析。

为了掌握高海拔地区隧道火灾的燃烧特性,得到高海拔特长铁路隧道火灾人员可用安全疏散时间,同时优化高海拔特长铁路隧道的防灾救援设计,作者以高海拔特长铁路隧道工程为背景,在深入研究国内外文献资料的基础上,主要采用实地调研、现场实测、理论分析、火灾模型试验和数值模拟相结合的方法对高海拔特长铁路隧道火灾燃烧特性和防灾救援技术进行了深入系统的研究。

全书共分为 7 章。第 1 章简要介绍了国内外目前隧道火灾研究的发展和现状,重点提出了本书的研究内容和研究思路。第 2 章采用现场试验的手段,在不同海拔高度地区进行火灾燃烧试验,主要研究高海拔条件对于火灾燃烧特性的影响,揭示了高海拔条件对于火

灾燃烧时间和火灾燃烧热释放速率的影响规律等。第3章主要介绍了在在建高海拔特长铁路隧道——关角隧道(32.645km)的斜井和泄水洞内分别进行的火灾燃烧的大尺寸模型试验和小尺寸模型试验,首次对高海拔隧道火灾的燃烧特性和烟气分布规律进行研究,测得了不同火灾规模条件下隧道内温度和烟气分布,通过对试验结果分析得到高海拔隧道火灾的燃烧特性,同时结合试验的分析结果针对高海拔隧道火灾的防灾救援设计提出了建议。第4章建立高海拔隧道火灾分析的数学模型,通过与现场试验的结果对比,验证了模型的合理性;采用数值模拟的方法对高海拔隧道火灾燃烧特性进行了对比分析;同时以高海拔特长铁路隧道为研究对象,采用数值模拟的方法,对隧道内不同火灾场景进行数值模拟计算,首次系统地探讨了高海拔特长铁路隧道在列车火灾情况下的火灾燃烧特性和烟气分布规律,同时根据隧道内火灾燃烧情况提出了高海拔特长铁路隧道火灾人员安全疏散的可用时间(ASET)。第5章从人员安全疏散的角度出发,建立人员疏散的数学模型,针对高海拔特长铁路隧道火灾后人员安全疏散问题,进行了计算机模拟计算分析。根据不同火灾场景、不同“定点”参数设置情况下人员安全疏散的需要时间(RSET),优化并提出了高海拔特长铁路隧道“定点”设置参数,诸如:“定点”的形式和长度、横通道间距、横通道数量等;同时针对列车着火后既无法驶离隧道,又不能够到达“定点”而只能停在隧道内其他任意位置的情况,列车在隧道内随机停车进行人员疏散,根据不同火灾场景、不同横通道间距设置情况下计算机数值模拟计算人员安全疏散的时间,提出了高海拔特长铁路隧道内横通道的间距设置参数。第6章探讨了高海拔特长隧道防灾救援设计的基本要求,将研究成果应用于实际工程,提出了针对高海拔特长铁路隧道旅客列车发生火灾后的防灾救援设计方案,即:高海拔特长铁路隧道定点防灾救援设计和随机停车防灾救援设计,包括事故的分类、防灾救援原则、防灾区域的划分、不同事故条件下防灾救援预案及防灾通风设计。第7章对本书中的研究成果进行了总结。

本书所述的有关研究工作,包括了“高原特长铁路隧道运营防灾救援技术研究”(铁道部科技研究开发计划重点课题,编号KCD09002531)和高海拔隧道火灾燃烧特性与防灾救援技术研究(太原科技大学校博士科研启动基金,编号20122040)等项目的主要研究内容。

在本书撰写过程中,北京交通大学谭忠盛教授提出了许多宝贵的修改意见和建议,太原科技大学晋民杰教授也为本书的出版给予了很大的帮助和鼓励,在此表示深深的敬意和衷心的感谢。

本书的第1章、第2章、第3章、第4章和第5章由太原科技大学张念撰写完成,第6章和第7章由太原科技大学张念与山西省交通科学研究院韩大千共同撰写完成。

本书在写作中参考了大量的相关文献和专业书籍,在此谨向相关作者深表谢意!由于作者理论水平和实践经验有限,书中难免还会有差错和不足之处,敬请读者批评指正,共同进步。

来信请寄:山西省太原市瓦流路66号太原科技大学交通与物流学院,张念收,邮编030024;电子信箱: zhangnian1984@126.com。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 国内外研究现状	3
1.2.1 隧道火灾现场试验研究	3
1.2.2 隧道火灾模型试验研究	5
1.2.3 隧道火灾数值模拟研究	7
1.3 评述	9
1.4 主要研究内容及方法	10
第 2 章 高海拔对火灾燃烧特性的影响试验研究	12
2.1 试验测量方法	12
2.2 高海拔火灾燃烧试验	13
2.2.1 试验基本环境参数	13
2.2.2 燃烧热释放速率测试试验过程	13
2.3 低海拔火灾燃烧试验	14
2.3.1 试验基本环境参数	14
2.3.2 燃烧热释放速率测试试验过程	15
2.4 试验结果分析	15
2.4.1 火灾燃烧过程分析	15
2.4.2 火灾燃烧时间和热释放速率分析	16
2.4.3 火灾燃烧火焰高度分析	16
2.5 本章小结	17
第 3 章 高海拔隧道火灾燃烧特性现场试验研究	18
3.1 高海拔隧道火灾大尺寸模型试验研究	18
3.1.1 试验斜井隧道概况	18
3.1.2 隧道火灾模型试验方法	19
3.1.3 试验记录	23
3.1.4 试验结果分析	25
3.1.5 火灾时隧道内温度场纵向分布规律	28
3.2 高海拔隧道火灾小尺寸模型试验研究	30
3.2.1 试验模型隧道概况	30
3.2.2 隧道火灾模型试验方法	30
3.2.3 试验记录	32
3.2.4 试验结果分析	34

3.2.5 火灾时隧道内温度场纵向分布规律	34
3.3 对试验结果的分析	35
3.4 本章小结	36
第4章 高海拔特长铁路隧道火灾燃烧特性数值模拟研究	37
4.1 隧道火灾数值模拟计算方法	37
4.1.1 火灾模型基本控制方程	38
4.1.2 烟气浓度计算模型	39
4.1.3 数值模拟计算流程	40
4.2 模型试验的数值模拟验证	41
4.2.1 试验数值模型的建立	41
4.2.2 数值模拟结果与试验结果的对比	42
4.3 高海拔隧道火灾燃烧特性分析	45
4.3.1 隧道火灾模型验证	45
4.3.2 高海拔与低海拔隧道火灾燃烧特性对比	48
4.4 高海拔特长铁路隧道火灾数值模拟	49
4.4.1 高海拔特长铁路隧道数值模型的建立	49
4.4.2 数值模拟计算结果分析	55
4.5 本章小结	62
第5章 高海拔特长铁路隧道火灾安全疏散及救援模式研究	63
5.1 隧道火灾中的安全疏散问题	63
5.1.1 影响隧道火灾人员安全疏散的因素	63
5.1.2 隧道火灾安全疏散准则	65
5.1.3 人员疏散计算数学模型	66
5.1.4 人员荷载及特征属性	68
5.1.5 高海拔隧道火灾人员行走速度	70
5.2 高海拔特长铁路隧道定点救援模式分析	74
5.2.1 隧道内定点形式及疏散救援方式	74
5.2.2 高海拔特长铁路隧道“定点”救援人员疏散模拟计算	75
5.2.3 高海拔特长铁路隧道“定点”救援人员疏散模拟结果	76
5.2.4 计算结果分析	78
5.3 高海拔特长铁路隧道随机救援模式分析	78
5.3.1 高海拔特长铁路隧道内随机疏散救援方式	79
5.3.2 高海拔特长铁路隧道随机停车救援人员疏散模拟计算	79
5.3.3 高海拔特长铁路隧道随机停车救援人员疏散模拟结果	81
5.3.4 计算结果分析	83
5.4 本章小结	84
第6章 高海拔特长铁路隧道防灾救援系统设计研究	85
6.1 高海拔特长铁路隧道防灾类型及防灾救援思路	85
6.1.1 铁路隧道防灾类型	85

6.1.2 高海拔特长铁路隧道防灾救援的基本要求	87
6.1.3 高海拔特长铁路隧道灾害救援思路及疏散救援方案	88
6.2 国内外典型特长铁路隧道防灾救援系统设计	88
6.3 高海拔特长铁路隧道“定点”疏散救援方案设计	98
6.3.1 “定点”个数和位置的选择	98
6.3.2 “定点”的形式及疏散方式	100
6.3.3 “定点”疏散段纵向长度	101
6.3.4 “定点”内横通道间距	101
6.3.5 “定点”内避难室的设计	101
6.3.6 “定点”的站台设计	101
6.3.7 “定点”人员安全疏散方案	104
6.3.8 “定点”内的设备系统	104
6.4 高海拔特长铁路隧道随机停车疏散救援方案设计	107
6.4.1 隧道横通道间距的设置	107
6.4.2 隧道内随机停车疏散救援的方式	107
6.4.3 隧道内随机停车疏散方案	107
6.4.4 随机停车隧道内疏散段设计	108
6.5 高海拔特长铁路隧道防灾通风设计	109
6.5.1 “定点”内防灾通风设计	109
6.5.2 隧道内防灾通风设计	111
6.6 本章小结	113
第7章 结论	114
参考文献	116

第1章 绪 论

1.1 引言

由于我国多山区的地形特点,我国铁路网上分布着大量的铁路隧道。截至2008年底^[1],我国现有铁路隧道7500多座,总里程超过4300 km。随着铁路建设工程的发展,长隧道的规模和数量也日益增多,其中3km以上的有近200座。

从20世纪80年代大瑶山隧道(14.3km)突破10km以后,长大隧道不断出现,隧道已经呈现出愈修愈长的态势。已经建成的长度为10~20km的隧道,如:朔黄线长梁山隧道(12.8km)、西康线秦岭隧道(18.4km)、宁西线东秦岭隧道(12.6km)、渝怀线圆梁山隧道(10.8km);已经建成通车的大于20km的隧道,如:兰武线乌鞘岭隧道(20.05km)、石太客专太行山隧道(27.8km)、太中银线吕梁山隧道(20.8km);正在施工的山区隧道有5000km,如:青藏铁路西格段关角隧道(32km)、向莆铁路戴云山隧道(27.78km)、青云山隧道(22.15km)、高盖山隧道(21.05km);待开工的山区隧道有9000km,如:被称作“地下铁路”的兰渝线上的西秦岭隧道(29.71km)^[1,2]。这一系列长大铁路隧道修建的同时也带来了长大隧道安全问题的出现。

铁路隧道内列车发生灾害主要可以分为脱轨翻车和隧道内列车火灾两类^[3]。在这两类事故中,以列车火灾的发生概率为最高,脱轨翻车次之,因此铁路隧道的防灾救援主要是针对以列车火灾为主的灾害。

隧道是空间狭长的建筑,一旦在隧道内发生火灾,将产生大量的有毒烟雾和高温热烟气^[4],致使人员疏散困难、救火难度大,损坏程度严重。铁路隧道内若发生列车火灾,火灾在隧道内的蔓延速度快,由于列车车厢的密闭性和列车在隧道内的阻塞比较大,导致隧道内的排烟困难,洞内可视性差,且消防救援设备和救援人员难以接近火灾事故列车,严重影响隧道内的人员安全救援疏散,因此铁路隧道内的列车火灾一般经济损失和人员伤亡都比较严重。铁路隧道火灾不但会导致整条线路交通的瘫痪,极大地影响正常的生产和生活的进行,导致社会经济的损失,同时也会带来严重的社会负面影响,降低公众对隧道安全性的信任。

据有关资料统计^[5~13],自1970年以来,各国客货列车在铁路隧道内发生的火灾事故已超过30起,在我国这类事故自1976年至1997年之间共发生7起,累计中断行车时间达2500h,人员伤亡超过300人(死亡115人),其直接经济损失超过3000万元,间接经济损失则无法估计,国内外近年来发生的重大铁路隧道火灾情况详见表1.1。

特长铁路隧道由于其长度较大,隧道内发生火灾时列车很难在安全时间内驶出洞外,对人员的生命安全和隧道结构都会造成极大的威胁。因此,在我国长大铁路隧道修建的背景下,如何保证隧道的安全性是一个非常重要的问题。

对于一般特长铁路隧道防灾救援研究国内外已取得一些成果。英法海峡隧道

(49.4km)、日本的青函隧道 (53.85km)、大清水隧道 (31.2km) 都曾开展过相应的研究工作。我国这方面的研究工作起步相对较晚, 铁路隧道的防灾救援技术从 20 世纪 80 年代后期才开始起步^[14~16], 其中, 西康线上的秦岭隧道 (18.4km)、兰武复线上的乌鞘岭隧道 (20.05km)、石太客运专线上的太行山隧道 (27.8km), 分别从消防技术等方面进行过理论分析。

国内外铁路隧道火灾案例

表 1.1

发生时间	隧道名称	事故伤亡损失	事故原因	消防救援方式
1972. 11. 6	日本 北陆隧道	伤 714 人, 死亡 30 人	餐车电采暖接线不良, 造成漏电	前后车厢与着火餐车分 离, 切断电源
1976. 3. 23	丰沙线旧窝庄东 46 号隧道	中断正行车 54h34min	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, 减小事故损失
1976. 10. 18	宝成线白水江 140 号隧道	死亡 75 人, 重伤 9 人, 中断运行 382h15min	超速制动过猛, 油罐破 裂起火燃爆	沙袋封堵洞口注水
1987. 8. 23	陇海线兰州 十里山 2 号隧道	中断运行 201h56min, 死亡 2 人, 直接经济损失 117 万元	线路与钢轨断裂, 脱轨 后撞击起火	定向爆破 2.3 万方, 封闭 洞口注水 2.8 万方
1987. 11. 5	美国斯普罗 乌尔隧道	损失 25.5 万美元, 行 车中断 15d	附近燃烧的树叶被列车 风卷入隧道引燃了隧道的 木护板	用土堵塞隧道两个洞口并 向隧道内灌入二氧化碳
1990. 7. 3	襄渝线 梨子园隧道	死亡 4 人, 伤 14 人, 中断行车 550h54min	接触网悬挂点绝缘子表 面放电引燃汽油团爆炸	平板车加沙袋封堵洞口, 并注水 1.6 万方
1991. 7. 18	京广线 大瑶山隧道	死亡 12 人, 伤 20 人	17 号车旅客吸烟起火	列车自带灭火器灭火
1992. 9. 15	青藏线 岳家村 18 号隧道	中断行车 82h19min, 直接经济损失 132.6 万	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. 6. 12	西延线 蒿家川隧道	死亡 8 人, 伤 10 人, 中断行车 579h17min	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. 11. 11	奥地利 基茨施坦 霍恩山隧道	死亡 155 人, 伤 18 人	列车上电采暖空调过热, 使保护装置失灵	自然熄灭

而青藏铁路线的修建又将我国铁路隧道修建的海拔高度提到了前所未有的高度, 例如: 风火山隧道 (平均海拔 4900m), 祁连山隧道 (平均海拔 4000m), 关角隧道 (平均海拔 3300m), 这些高海拔铁路隧道的修建, 不但对隧道修建技术提出了新的挑战, 同时对于隧道的防灾救援设计也提出了新的问题。尽管目前国内外对于特长隧道防灾救援设计和防灾救援技术进行了一定的研究, 得出了一定的结论, 并且也应用于实际工程中, 但对于海拔高度超过 3000m 的特长铁路隧道, 还没有开展过类似的防灾救援技术研究。在高海拔情况下, 对于隧道火灾的防灾救援存在两个重要难题: 一是空气浮力小, 隧道内火灾温度场分布和扩散规律、烟雾场分布和扩散规律将不同于一般隧道; 二是高海拔隧道空气稀薄, 含氧量低、气压低、气温低, 在这一地区人的活动量 (逃生速度) 受到极大限制,

隧道火灾时人员的安全疏散受到极大挑战。因此,高海拔特长铁路隧道防灾救援设计不同于一般特长铁路隧道。

另外,目前我国铁路隧道防火标准和有关规范还不够完善,在铁路隧道的设计和施工中火灾预防的考虑也还不够充分,难以满足实际的需要。

综上所述,充分做好高海拔特长铁路隧道火灾防灾救援及人员安全疏散研究,建立我国高海拔特长铁路隧道火灾风险评估方法,制定统一的高海拔铁路隧道安全标准设计规范及管理规定,经济、合理的设置高海拔铁路隧道防灾救援系统,对于推动铁路隧道防灾救援技术以及隧道建设事业的发展,保障人民群众的生命和财产安全具有重大意义。

1.2 国内外研究现状

国内外针对隧道火灾燃烧特性与人员安全疏散的研究,研究的方式主要可以分为:火灾现场试验、火灾模型试验以及数值模拟分析几个方面。近30年来,国内外的学者从试验测试和计算机数值模拟两个方面对此进行了大量的研究,也得出了很多推动隧道火灾研究的结论。

1.2.1 隧道火灾现场试验研究

为获得理想的隧道防火设计,各国对铁路隧道实体全尺寸火灾的试验研究均给予了足够的重视^[17],投入了大量的人力物力开展有关的试验研究工作。

1974年10月日本在宫古线猿峠隧道内进行了运行列车的着火试验,试验结果认为,列车在着火后在隧道内再继续运行15min是安全的,同时,在隧道内火灾条件下着火车厢的温度比露天着火车厢内的温度高得多。

1974~1975年,奥地利在废弃的Zwenberg隧道进行了隧道实体火灾试验。试验结果发现,不同的通风方式对油料燃烧速度(即热释放速率)的影响较大,同时对烟气流向及温度分布也有较大影响。

1985年德国在盖尔森基兴——稗斯麦市的地铁隧道内进行了首次火警性能状态试验,得出了在不同的通风方式和火灾荷载条件下温度与火灾持续时间关系的第一手材料。

1990~1993年,欧洲九国联合分别在德国、芬兰、挪威的三座隧道内进行大规模火灾试验^[18,19],主要对起火范围及整个隧道长度上的温度、热传导、烟气流量、烟气浓度以及火灾对隧道能见度的影响进行了测量,试验结果表明:隧道内的温度—时间曲线与标准的ISO温度—时间曲线相比较,达到最高温度的时间较迟且延续时间较短,有利于隧道防火结构的设计。

1993~1995年,美国马萨诸塞州高速公路局和联邦公路管理局在弗吉尼亚纪念隧道(Memorial Tunnel)进行的足尺火灾通风试验,即MTFVTP(Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program)。主要研究了不同通风系统的烟气控制效果以及泡沫喷淋对油池火灾的作用。

2003年9月,研究者在挪威西部的一座废弃的隧道—Runehamar隧道里进行了4次大规模的实体火灾试验^[20],试验所采用的火源燃烧物分别为:T1木和塑料盘、T2木盘和床垫、T3家具和灯具、T4纸箱和聚苯乙烯杯。试验纵向风速约2.5m/s,测得了如图1.1、图1.2所示数据。

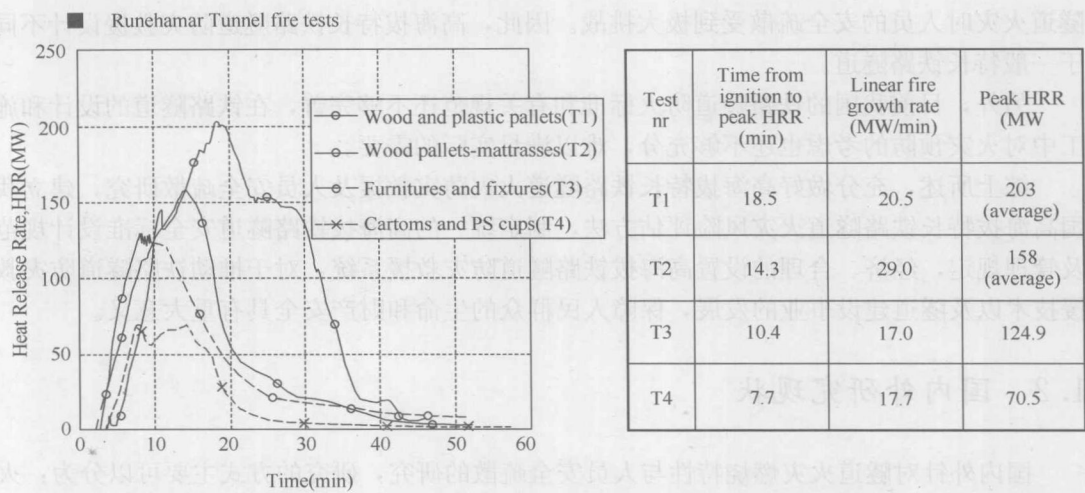


图 1.1 不同火源热释放速率

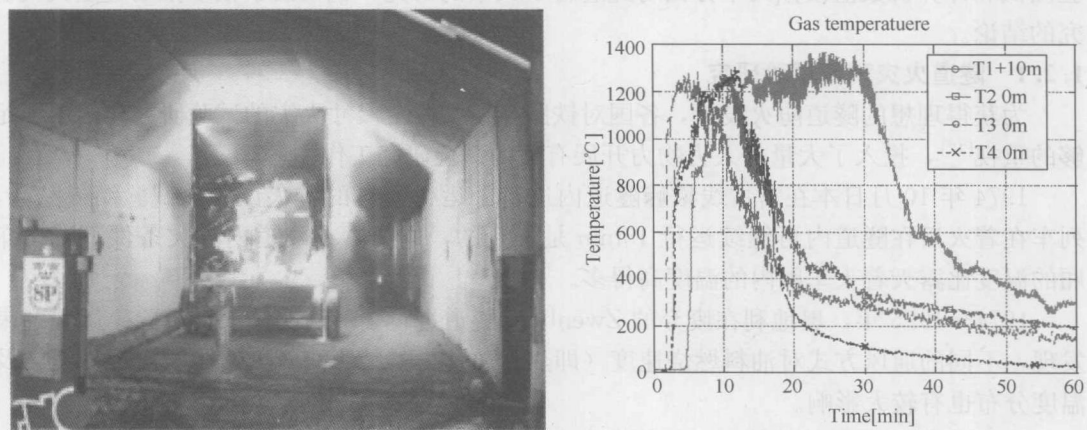


图 1.2 Runehamar 隧道大规模实体火灾试验结果

试验所采用的火灾规模在峰值热释放速率在 70.5~203MW 之间,试验结果表明:在峰值热释放速率为 203MW 时,隧道在离火源 10m 处,18.5min 内达到最高温度为 1365℃;火灾持续最高温度的燃烧时间约为 30min。

由于客观条件的限制,国内对于隧道火灾的全尺寸实体试验进行的较少。中国科技大学的胡隆华,霍然^[21~23]等(2006)在云南阳宗隧道(单向三车道)、大风垭口隧道(单向双车道)和元江 1 号隧道、3 条公路隧道上进行了 10 次全尺寸试验,研究不通火灾条件和风速下烟气的运动情况。主要测量了各隧道 1000m 范围内的拱顶下方烟气温度、烟气层高度分布以及烟气前锋的运动情况等,并分析了纵向风速对火灾羽流形态、烟气前锋运动速度、隧道内线型缆式感温探测系统响应等的影响。

从以上国内外所进行的火灾现场试验可以看出:国外所进行的隧道实体尺寸火灾试验主要是针对火灾持续时间和温度之间的关系,得出了一定的结论;国内长大铁路隧道的建设起步于 20 世纪 80 年代后期,对于铁路隧道火灾的研究还处于起步阶段,隧道火灾现场试验比较少,并且主要还是集中在公路隧道的火灾研究。

1.2.2 隧道火灾模型试验研究

由于火灾现场试验需要耗费大量的资金和人力物力,同时大规模火灾试验也受现场试验条件的限制,所以国内外许多学者常采用缩尺比例模型试验来研究隧道火灾。

日本的奥宫正哉(1993)采用1/40的缩尺模型开展大空间火灾烟气流动研究,得出了大空间建筑物内火灾烟气流动的规律。Yasushi Oka 和 G. T. Atkinson^[24](1995)采用1/10缩尺的隧道模型,研究隧道火灾时烟气的运动状况,试验结果表明:当火灾热释放速率小于一定值时,临界风速与热释放速率的1/3次方成正比;当火灾热释放速率大于这个值时,临界风速与其近似无关。G. T. Atkinson 和 Y Wu^[25](1996)又在这一模型隧道内进行了坡度对烟气运动影响的试验,提出坡度修正公式。Wu 和 M. Z. A. Bakar^[26](2000)使用模型试验和数值模拟两种方法相结合对相同高度、不同宽度的5种断面隧道进行了研究,采用隧道水力高度(大小等于隧道截面面积与隧道湿周的比值的4倍)作为参数,推导了临界风速的计算改进公式,进一步完善了临界风速的研究。

对于隧道火灾拱顶最高温度研究则以日本的 Kurioka 等人的研究最具代表性。Kurio-ka^[27]等人(2003)通过不同尺寸模型对不同纵向通风速率下隧道火灾时火源区域附近的温度进行了研究,其采用的火灾模型隧道如图1.3所示。

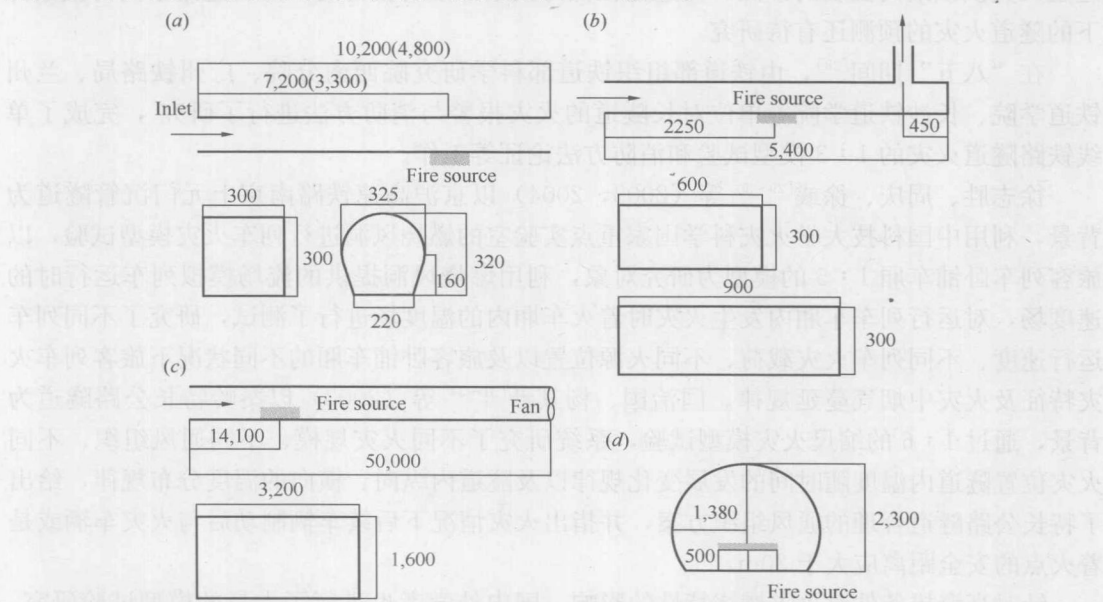


图 1.3 Kurioka 等人的模型隧道示意图 (单位: mm)

(a) Tunnel A; (b) Tunnel B&C; (c) Tunnel D; (d) Tunnel E

通过对试验所得数据的拟合分析(图1.4),得到了预测隧道火源上方拱顶处最高温度的理论模型:

$$\frac{\Delta T_{\max}}{T_a} = \gamma \left(\frac{Q^* 2/3}{Fr^{1/3}} \right)^\epsilon \quad (1.1)$$

式中

$$Q^* 2/3 / Fr^{1/3} < 1.35, \gamma = 1.77, \epsilon = 6/5; Q^* 2/3 / Fr^{1/3} \geq 1.35, \gamma = 2.54, \epsilon = 0;$$

Q^* 为无量纲的火源热释放速率: $Q^* = Q / (\rho_a C_p T_a g^{1/2} H_d)$

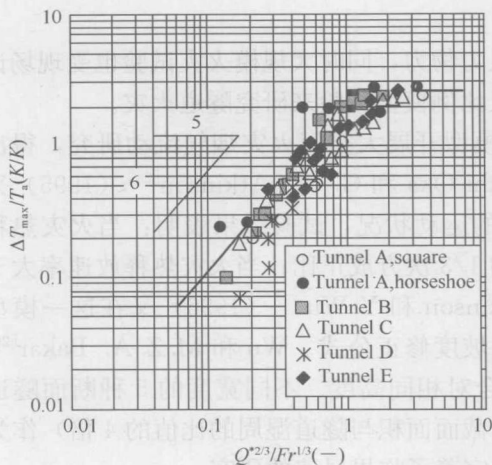


图 1.4 Kurioka 等人对隧道火羽流上方拱顶处烟气最高温度的试验拟合结果

隧道火灾拱顶最高温度的预测。但这是在低海拔条件下所获得的，是否适用于高海拔条件下的隧道火灾的预测还有待研究。

在“八五”期间^[28]，由铁道部组织铁道部科学研究院西南分院、广州铁路局、兰州铁道学院、长沙铁道学院等单位对长隧道的火灾报警与消防方法进行了研究，完成了单线铁路隧道火灾的 1:3 模型试验和消防方法论证等工作。

徐志胜、周庆、徐彧^[29~30]等（2003，2004）以京沪高速铁路南京上元门沉管隧道为背景，利用中国科技大学火灾科学国家重点实验室的燃烧风洞进行列车火灾模型试验，以旅客列车卧铺车厢 1:5 的模型为研究对象，利用燃烧风洞提供的流场模拟列车运行时的速度场，对运行列车车厢内发生火灾时着火车厢内的温度场进行了测试，研究了不同列车运行速度、不同列车火灾载荷、不同火源位置以及旅客卧铺车厢的不同状况下旅客列车火灾特征及火灾中烟气蔓延规律。闫治国、杨其新^[31~34]等（2003）以秦岭特长公路隧道为背景，通过 1:6 的缩尺火灾模型试验，系统研究了不同火灾规模、不同通风组织、不同火灾位置隧道内温度随时间的发展变化规律以及隧道内纵向、横向的温度分布规律，给出了特长公路隧道合理的通风组织方案，并指出火灾情况下后续车辆制动后与火灾车辆或是着火点的安全距离应大于 30m。

针对高海拔条件对火灾燃烧特性的影响，国内外学者也进行了大量的模型试验研究。Wieser D 和 Jauch P^[35]（1997）为研究海拔高度对火灾燃烧的影响，采用了一个缩小规模的 6m×2.8m×2.1m 的移动测试室，火灾海拔从 400m~3000m 高度，在所有高度可燃物的参数保持不变。试验结果表明：随着海拔的升高，外界大气压力和空气密度逐渐减小，相同条件下火灾燃烧发展的速率逐渐降低减缓，火灾燃烧时间会增加。

孔文俊、吐尔逊·艾力江^[36]等（2002）对在不同重力环境下辐射加热材料表面着火特性进行了理论分析，得出：压力影响试样的着火延迟时间和燃烧反应速率。在相同温度下，燃烧反应的速率与压力成正比，压力减小，使得热解和燃烧反应的速度变慢，着火延迟时间增加，达到着火燃烧所需要的可燃物和氧气的浓度所经历的时间就变长；同时，环境压力小，不利于火焰稳定地附着在木材的表面，降低了燃烧速率，到达着火的时间就越

Fr 数也为无量纲，其定义为： $Fr = u^2 / (gH_d)$

ρ_a 、 T_a 、 H_d 、 u 分别为纵向来流空气的密度、温度、火源面到拱顶的高度和来流空气的纵向速度。

可以看到，公式适用于纵向风速较大的情况来预测隧道拱顶的最高温度，而当纵向来流风速较小甚至为 0 时，公式中的 Fr 值趋近于 0，此时其预测结果与真实情况差别就会比较大。

胡隆华^[21]通过全尺寸试验数据和数值模拟相结合的方法，对 Kurioka 模型进行了验证，结果表明，Kurioka 等人通过试验所建立的模型具有较好的可靠度，可以推广至一般

长,试样接收到的热辐射量大,着火温度高。袁理明^[37]运用相似理论和量纲分析的原理,得出二维线性湍流浮力扩散火焰高度与火源功率和火源尺寸的关系,并用长宽比较大的火源代替二维线性火源的试验方法验证了这一关系式,给出了计算二维线性湍流浮力扩散火焰高度的完整的公式,得出由二维线性火源产生的火焰高度与火源功率的 $2/5$ 次幂成正比。

近年来,中国科学技术大学火灾试验室在高海拔火灾试验方面做了比较多的研究^[38~45],如:孙晓乾、李元洲等(2006)针对西藏古建筑中广泛使用的松木,分别在拉萨与合肥两地的燃烧小室内进行了着火试验。在恒定热流 $42\text{kW}/\text{m}^2$ 下,测得了三种不同尺寸松木试样的表面温度曲线、着火温度和着火时间,并分析了氧气含量和压力对着火温度和着火时间的影响;通过对比试样着火图像序列,分析了火焰大小的差异。试验表明:三种试样在拉萨的着火时间远比在合肥的迟,着火温度要高,火焰体积更大。于春雨、张永明等(2007)为研究青藏高原低压低氧环境下烟雾浓度和点式感烟火灾探测器灵敏度的变化,在拉萨和合肥两地标准实验间中,进行国家标准试验火正庚烷火和棉绳阴燃火实验,并对烟雾浓度进行了模拟。研究发现烟雾浓度主要受燃烧质量损失速率的影响,而在拉萨和合肥相同质量损失速率实验产生烟雾浓度近似相等;高原环境对点型散射式光电感烟火灾探测器灵敏度影响较大,对点型离子感烟火灾探测器灵敏度影响不明显。徐伯乐等(2011)通过拉萨和合肥两地开展相同尺寸的甲醇油池火燃烧实验,研究了高原油池火燃烧特性参数与平原的不同以及具体的影响机制。研究发现,在燃料类型和燃烧尺寸相同的情况下,燃料在拉萨的质量燃烧速率比合肥慢;基于火焰图像分析,用 MATLAB 编程对两地火焰图像进行处理,确定了在相同尺寸的油盘下,由于受低氧低压条件的影响,拉萨火焰面积比合肥要大,火焰高度比合肥要高,在拉萨火焰振荡频率比合肥要快;通过实验数据拟合出适合高原低氧低压环境下的火焰振荡频率公式。

可以看到国内外的火灾模型试验主要以小尺寸的模型试验为主,结合模型试验所得数据对火灾过程进行分析,所得的数据和结论必定有一定的局限性。国内外对于高海拔火灾燃烧特性的研究局限于对单纯火灾火源的燃烧特性上,但是所得到的数据和经验对于隧道火灾的深入研究仍然有着积极指导的意义。

1.2.3 隧道火灾数值模拟研究

数值模拟是基于计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)方法,采用计算机模拟预测隧道火灾规律是一种有效的方法,相比较现场试验和模型试验,这种方法具有参数设定的任意性、预测结果的可再现性等优点,节约资金,可以方便地对不同的影响因素、不同的火灾过程进行研究。国内外近年来也多采用此种方式对隧道火灾过程的燃烧特性及烟气流动状况进行研究。

Cox 和 Kumar^[46,47](1987)较早地采用 CFD 方法研究公路隧道的火灾问题,建立了 JASMINE 数学模型,研究隧道不同纵向风速下隧道内中型火灾的温度场、流场、烟气浓度场的动态发展。除火源附近外,模拟结果与奥地利 Zwenberg 模型试验结果吻合较好。同时,改变 JASMINE 模型中输入火源的热释放速率随时间变化的数据,模拟了火灾的非稳态发展状况。Woodburn 和 Britter^[48,49](1996)采用 FLOW3D 软件模拟了隧道内火源附近以及火源下风方向区域的火灾燃烧特性及烟气流动状况,着重考察了影响数值模拟结果的因素。研究表明:除纵向通风速度对烟气的回流扩散范围具有决定性影响外,火源的

热释放速率以及紊流模型的选择对烟气回流扩散范围影响也较大,而火源下风方向区域的温度场、速度场与紊流模型的选择几乎无关,但与自然对流换热、辐射换热以及壁面粗糙度有关;火源下风方向区域若不考虑高温烟气对壁面的辐射换热,温度场模拟结果则较试验数据偏高。C. C. Hwang^[50]和 J. C. Edwards (2005) 利用基于 LES 理论的 CFD 软件对隧道火灾纵向通风工况进行了模拟,得出了隧道火灾时纵向通风的临界通风风速,并将模拟计算结果与理论计算公式计算结果进行了对比,同时给出了隧道火灾时临界风速条件下隧道内的流场和温度分布。

那艳玲^[51] (2003) 针对地铁火灾发生的各种状况如有屏蔽门和无屏蔽门的站台、站厅及列车火灾的各种情况的温度场和气流场进行了 CFD 仿真模拟,并分析了火灾发生的位置及排烟量对地铁车站气流场和温度场的影响。赵相等^[52] (2005) 用 CFD 软件模拟了 10MW 火灾规模下,600m 长的广州地铁二号线区间隧道的火灾烟气流动特性。分析了火灾烟气特性随火灾发展过程的变化情况,得到了烟气特性变化曲线,针对不同的火灾荷载,并研究了临界风速随火灾强度的变化关系。香港理工大学的学者 Chow W K^[53,54] (2004) 利用 CFD 模拟了隧道火灾的烟气特性,并比较了大涡模拟 (LES) 与二方程紊流模型的计算结果。研究表明: LES 可以更好地模拟火灾时的烟气回流及隧道断面的热分层现象,但 LES 对烟气温度的模拟计算结果大大高于试验数据。中国安全生产科学研究院的钟茂华和史聪灵^[55,56] 等采用大涡湍流模型 (LES) 对典型浅埋岛式站台列车火灾和深埋岛式地铁站台火灾的烟气蔓延规律进行了数值模拟计算,分析烟气在隧道、站台以及站厅内蔓延时烟气温度、有毒气体浓度和能见度等特征参数分布情况;同时探讨了火灾时深埋岛式站点内有效的气流组织形式和隧道排烟系统的运行模式。赵耀华^[57] 等人 (2007) 对地铁车站及隧道火灾的模拟边界提出了简化计算模型——连体模型法,即当某地铁站发生火灾时,计算区域可只考虑其两端各一个车站和各两个区间;当某隧道内发生火灾时,计算区域只需考虑该隧道两端各两个车站和各一个隧道区间。研究者采用 PHOENICS 软件对通风排烟过程中的空气流动特性进行了数值模拟计算分析。赵望达^[58] 等 (2010) 以狮子洋隧道为研究对象,对不同火源热释放速率、不同通风风速、不同隧道断面当量直径及不同坡度情况下的隧道火灾进行了数值模拟。分析了隧道烟气逆流层长度的变化规律,并对模拟数据进行了拟合。结果表明:当火源热释放速率增大到一定程度时,烟气的逆流层长度趋于与火源热释放速率变化无关;得出的烟气逆流层长度与火源热释放速率、通风风速及隧道断面当量直径关系的公式是合理的,且有所创新。

近年来国内外学者对于人员安全疏散的研究多集中在采用数值模拟的方法进行。Colino^[59] 等 (2006) 研究了铁路隧道里列车中部发生火灾情形下的人员逃生,通过求解一个方程可以得到保证人员安全的疏散通道间距,对方程进行了参数分析,并将公式应用于不同的铁路隧道 (双洞单线、单洞双线等)。Miclea^[60] 等 (2006) 通过研究发现,隧道内发生列车火灾,火灾发生在列车的哪个部位是影响人员逃生的一个非常重要的因素。当发生在两端时,人员可以向送新风方向逃生而不会受到烟气的影响;当发生在中部时,无论怎么组织通风,必然有一部分乘客会有一段时间受到烟气的影响。Daniel Nilssona^[61] 等 (2009) 研究了公路隧道中的标识和安全设施设置对于人员安全疏散的影响。选取在 1km 长公路隧道范围内,模拟火灾烟气和隧道安全警报等压力条件下进行测试,研究结果表明,隧道中设置的标识随给出的信息量水平影响着驾驶者的判断,同时指出隧道火灾发生

时声信号是最好的指引方式。

国内关于隧道火灾中人员安全疏散的研究也在不断发展,但也是大多采用数值模拟的方法进行。谢灼利^[62]等(2004)应用火灾模拟软 SMARTFIRE4.0 对某地铁站站台着火时温度和烟气浓度的发展进行了数值模拟研究,并计算了人员疏散时间。结果表明:该地铁站发生火灾时,站台至站厅的楼梯是整个疏散过程的瓶颈,而楼梯的疏散能力主要受人员流量和楼梯的有效宽度所制约,据此提出了相应的解决方法。杨延萍等^[63](2006)采用 CFD 方法模拟了两种纵向风速 1m/s 和 2m/s 下隧道内火灾烟气的发展情况,分析了人员疏散方向离火源点不同距离处烟气的温度和浓度分布。提出了利用地铁联络通道来疏散部分人群的方法,得出了使联络通道内无烟的纵向通风速度。中南大学的杨高尚等^[64~68](2007)阐述了一种计算横通道间距的方法,根据隧道火灾特点,从人员安全疏散观点出发,模拟分析特长隧道在 4 种不同火灾场景下的典型自然疏散过程,并运用火灾模拟软件 FDS 计算不同火灾场景、不同横通道间距情况下的危险时间,然后与相应的包含人员疏散行为特征的疏散时间相比较,得出最适宜的横通道间距,并分析了其经济性。北京交通大学的毛军和郝艳红^[69~71]等(2008, 2009)认为以北京地铁 1 号和 2 号线的典型车站为具体对象,对地铁火灾的烟气流动规律与控制以及人员疏散进行了数值模拟分析,并将结果应用于地铁火灾应急预案的编制中。同时,采用虚拟现实技术,对应急预案及演练进行了动态仿真,提出了基于数值模拟和仿真的地铁火灾应急预案性能化设计的新思想。长安大学夏永旭^[72](2009)认为火灾是公路隧道最为严重的灾害之一。分析克拉尼提出的高温条件下人员逃生公式,结合公路隧道火灾时的人员逃生情况,对克拉尼公式进行修正。采用有限元数值模拟方法,详细地研究典型隧道结构段在不同环境风速、不同火灾规模时隧道内的温度场,以修正后的隧道火灾人员逃生公式为判别条件,给出隧道内人员可能逃生的位置和消防救援的安全位置。方银钢等^[73](2010)以上海长江隧道为研究对象,利用 smartfire 软件和 buildingEXODUS 软件对上海长江隧道的疏散排烟系统在正常运营和阻塞两种工况下的安全性进行了评估,然后提出了上海长江隧道火灾时的疏散救援相关措施和建议。

基于此,可以看出目前国内外对于隧道火灾以及人员安全疏散的研究多采用数值模拟的手段进行。目前在隧道火灾人员安全疏散方面,国内外研究的主要研究思路是:通过计算机模拟,分析计算隧道达到危险的时间(即疏散可利用时间 ASET, Available Safe Evacuation Time)与人员疏散所需时间(RSET, Required Safe Evacuation Time)来评估火灾时逃生的安全性。

1.3 评述

综上所述目前,国内外学者通过大量的火灾试验和数值模拟的方式对于隧道火灾和人员安全疏散进行了大量的研究,得出了很多推动隧道火灾研究的结论,为提高隧道的安全运营发挥了积极的作用,但是这些研究多集中在对公路隧道和地铁隧道的研究,对于高海拔特长铁路隧道火灾燃烧特性和人员安全疏散的研究还不够完善,总结几点如下:

1) 近年来国内外学者对海拔高度对火灾燃烧的影响进行了一定的研究,对于高海拔火灾燃烧特性的研究局限于对单纯火灾火源的燃烧特性上,未见将高海拔结合隧道火灾进