

公安部科技强警基础专项“建筑防火与消防工程技术学术交流”项目资助

2015消防工程技术 国际学术研讨会论文集

张清林 刘暹亚 主编

2015 消防工程技术国际学术 研讨会论文集

张清林 刘昶亚 主编

内 容 简 介

本书共编辑收录了“2015 消防工程技术国际学术研讨会”的 35 篇优秀论文。论文涵盖了建筑材料与建筑结构防火,石油化工与工业建筑防火、防爆,地铁、隧道特殊建筑及工程防火,火灾风险评估与性能化防火设计以及清洁高效灭火技术与消防工程应用技术等研究方向和内容,均是近年来活跃在消防工程技术研究领域的专家、学者以及消防部队基层技术人员学术理论研究和实践的结晶。

本书得到了公安部科技强警基础专项“建筑防火与消防工程技术学术交流”项目的资助。

图书在版编目(CIP)数据

2015 消防工程技术国际学术研讨会论文集/张清林,刘
暉亚主编. —天津:天津大学出版社,2015. 10

ISBN 978-7-5618-5445-7

I. ①2… II. ①张… ②刘… III. ①建筑物—消防—
国际学术会议—文集 IV. ①TU998.1-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 251307 号

出版发行 天津大学出版社
地 址 天津市卫津路 92 号天津大学内(邮编:300072)
电 话 发行部:022-27403647
网 址 publish.tju.edu.cn
印 刷 廊坊市海涛印刷有限公司
经 销 全国各地新华书店
开 本 185mm × 260mm
印 张 21
字 数 512 千
版 次 2015 年 11 月第 1 版
印 次 2015 年 11 月第 1 次
定 价 68.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,烦请向我社发行部门联系调换

版权所有 侵权必究

论文集编委会

张清林 宋 波 赵力增 倪照鹏 刘晔亚
李晓焰 邱培芳 于年灏 许晓元 纪 超
李晶晶 朱红亚 王鹏飞 彭 磊

前 言

随着中国经济和社会的快速发展,高层、超高层建筑、综合体建筑以及高大工业建筑的数量日益增多,其规模和体量也越来越大,由此所产生的火灾风险也日益增大,消防安全形势不容乐观。现代公共建筑及工业建筑人员与财富集中,一旦发生火灾,将会造成巨大的经济损失和重大的人员伤亡。近年来频发的一些重特大火灾事故暴露出我国在高层建筑、工业建筑防火、消防工程技术等方面仍存在许多问题。针对高层、超高层建筑、综合体建筑以及高大工业建筑等现代建筑形式的防火以及消防工程应用技术方面的研究也是目前国际火灾科学与消防技术研究的热点和难点。

学术交流作为科学传播,成果交流,智慧和思想碰撞、启迪的重要途径和形式,对推动科学技术发展、创新科技成果具有十分重要的作用。2015 消防工程技术国际学术研讨会,以“建筑防火与消防工程技术发展与展望”为主题,由公安部科技信息化局和公安部天津消防研究所主办,建筑消防工程技术公安部重点实验室承办,灭火救援技术公安部重点实验室、火灾现场勘验与物证鉴定公安部重点实验室、消防应急救援装备公安部重点实验室协办,于2015年10月18、19日在天津成功举办。大会组委会邀请了来自美国、英国、加拿大、冰岛、瑞典以及我国从事火灾科学研究、性能化防火设计以及火灾爆炸防治技术等方面研究的知名专家和学者,围绕工业火灾、爆炸防治、建筑消防性能化、隧道火灾防治与实验研究、大尺度火灾演化与模拟等热点问题进行了9场高水平的大会主题报告,并邀请了17位优秀学术论文作者进行大会论文交流。此次学术会议为我国消防科研工作者深入了解和掌握目前建筑防火与消防工程技术研究的国际前沿动态,与国内外从事火灾科学与消防工程技术研究的专家学者共同分享建筑防火与消防工程技术领域的科研成果,预测和展望建筑防火与消防工程技术的发展前景,提供了一次广阔的学术交流和思想碰撞的平台,对提升我国建筑火灾防控技术研究的能力和水平,推动我国建筑防火与消防工程技术发展具有重要意义和作用。

本次国际研讨会的成功举办,是公安部天津消防研究所在建所五十周年之际,由建筑消防工程技术公安部重点实验室首次承办的高水平大型国际学术会议。国内外知名专家

学者的特邀主题报告和青年学者的论文学术报告,内容丰富,精彩纷呈,更是国内外消防学界的新理念、新技术、新成果的激情碰撞,令全体参会者深受启发、受益匪浅。本次会议为公安部重点实验室今后的工作提出了新的任务,明确了新的攻关方向,更为重点实验室下一阶段的建设发展聚合了新的智慧与动力。

本次国际学术会议的召开得到了公安部科技信息化局、消防局以及中国消防协会等单位 and 科研院所的大力支持与协助,在建筑消防工程技术公安部重点实验室学术委员会审稿专家、重点实验室全体同人以及天津大学出版社编辑们的辛勤努力下,本论文集才得以顺利出版发行,对此一并表示诚挚的谢意。同时,对应征投稿的各界朋友们表示衷心的感谢。

由于文稿数量多,编辑工作量大、时间紧,且编者水平有限,本书有不当之处,敬请作者和读者指正。

编者

二〇一五年十月

目 录

不同封堵率下隧道火灾温度场数值模拟研究	1
地铁车厢火灾时顶棚下最高温升研究	10
集中排烟隧道火灾纵向机械补风风速研究	23
公路隧道消防安全评价技术研究	35
隧道消防机器人关键技术研究	44
铁路隧道紧急救援站及灭火技术研究进展	53
顶部开孔型隧道火灾研究综述	61
国内外公路隧道灭火设施设置现状分析研究	70
水下隧道横竖向疏散通道等效设置间距研究	78
浅析雾霾对消防救援的影响	83
紧急救援站发展现状及趋势分析	91
大型原油罐区消防应急能力评估	100
着火罐和邻近罐间传热过程分析和热辐射分布研究	111
醇类危化物品防火审核要点及灭火力量估算	119
惰化条件下铝粉爆燃火焰传播特性研究	125
LNG 池火及蒸汽云爆燃研究	135
Working toward an enhanced and integrated performance-based regulatory regime for fire safety	144
中庭烟气自然填充特点研究	154
公共建筑防烟分区控烟效果的探讨	163
中庭机械排烟与自然通风相结合的消防设计	172
基于物元模型的凤凰古城建筑火灾风险评价研究	182
Validation of a probabilistic occupant evacuation model CURisk based on Monte Carlo Method and application to mid-Rise buidings	192
某大型城市综合体空中连廊分阶段疏散策略研究	211
超高层建筑火灾情况下电梯疏散技术研究进展	218
探火管长度对超细粉体灭火装置灭火性能的影响	230
干式消火栓灭火系统设计初探	239
我国某核电厂主泵自动灭火装置的试验	244
两种烟道油垢火灾危险性的实验研究	252
基于 FLUENT 的斯坦纳水平隧道炉温度场分布规律研究	261
地面状况对人体静电电位影响的实验研究	268

防火涂料的生烟机理与抑烟技术研究进展	275
水性膨胀型钢结构防火涂料的应用及现状	283
电缆受热情况下绝缘失效类型及其时间的对比研究	290
阻燃 PVC 壁纸的制备及性能	296
养老设施火灾原因分析及预防	301
载客汽车发动机舱内火蔓延过程的随机分析	305

不同封堵率下隧道火灾温度场数值模拟研究

陈长坤^{1,2}, 王楠楠, 刘昶亚², 于年灏²

(1. 中南大学, 防灾科学与安全技术研究所, 湖南 长沙, 410075;

2. 建筑消防工程技术公安部重点实验室, 天津, 300381)

[摘要] 通过数值模拟的方法, 建立了一个长 8 m 的隧道模型, 采用甲醇作为模拟火源, 研究了不同封堵率(0%, 25%, 50%, 75% 及 100%) 对隧道内顶棚温度及隧道发生火灾时烟气分布的影响。研究结果表明: 当封堵率较小时(25%), 隧道内顶棚温度与未封堵时相比, 无明显变化且烟气层仍有明显的分层现象; 随着封堵率的增加(50%), 隧道内顶棚温度开始缓慢下降且烟气层开始紊乱; 当封堵率较大时(75%), 隧道内顶棚温度急剧下降且烟气层已无分层现象。此外, 在封堵的过程中存在一个临界封堵率, 当封堵率高于该临界值时, 隧道内的燃烧因氧含量不足而受到明显的抑制, 且隧道内温度将在短时间内大幅度下降。

[关键词] 封堵率; 隧道火灾; 顶棚温度; 烟气层; 数值模拟

Numerical simulation study on temperature distribution of tunnel fire with different sealing ratios

Chen Changkun^{1,2}, Wang Nannan¹, Liu Xuanya², Yu Nianhao²

(1. Institute of Disaster Prevention Science & Safety Technology, Central South University, Changsha, Hunan, 410075, China;

2. Key Laboratory of Building Fire Protection Engineering and Technology of MPS, Tianjin, 300381, China)

Abstract: An 8 m long tunnel model was built by numerical simulating to investigate the effect of different sealing ratios (such as 0%, 25%, 50%, 75% and 100%) on ceiling temperature inside tunnel and the smoke distribution of tunnel fire and the liquid methanol pool fire was used as the fire source. The results demonstrate that, for the relatively smaller sealing ratio (25%), the ceiling temperature inside tunnel is similar to the case of non-sealing, and the smoke layer could

项目基金: 湖南省自然科学基金重点项目(12JJ2033); 建筑消防工程技术公安部重点实验室开放课题(KFKT2014ZD02); 中央高校基本科研业务费专项资金资助。

作者简介: 陈长坤(1977—), 男, 汉族, 教授, 现任中南大学防灾科学与安全技术研究所副所长, 消防工程系副主任, 研究方向为火灾科学与消防工程。

联系电话: 13187060583.

电子邮箱: cckchen@csu.edu.cn.

作者简介: 王楠楠, 硕士研究生, 研究方向为隧道火灾。

电子邮箱: wangnannan915@126.com.

be observed obviously. With the sealing ratio increasing (50%), the ceiling temperature inside tunnel decreases slowly and the smoke layer is disordered. Moreover, for the relatively larger sealing ratio (75%), the ceiling temperature decreases sharply and the smoke layer could be observed hardly. In addition, there exists a critical sealing ratio during the sealing process, above which the combustion inside tunnel is depressed obviously due to a shortage of air supply and the temperature decreases dramatically in a short time.

Keywords: sealing ratio, tunnel fire, ceiling temperature, smoke layer, numerical simulation

0 前言

由于隧道特殊的地理环境与较为局限的空间,使得隧道火灾具有蔓延快、烟气温度高、不易控制及扑救困难等特点^[1]。2000年1月,奥地利 Kitzsteinhorn funicular 隧道内一列车因电暖空调过热着火,事故造成 155 人死亡、18 人受伤;2008年5月12日,宝成线 109 号隧道内一载有 600 t 石油的货车撞上巨石而引发火灾,消防官兵经过 9 天 8 夜的连续奋战才完成火灾扑救及抢险救援任务。2014年3月1日,中国山西省晋济高速岩后隧道内两辆甲醇车追尾相撞,因甲醇泄漏而起火燃烧,事故造成 31 人死亡、9 人失踪。可见,隧道火灾一旦发生,往往会造成巨大的人员伤亡和经济损失。因此,如何及时有效地扑救隧道火灾是减少损失的关键。而在扑救隧道火灾的众多战术中,封堵则是最简单且行之有效的方法之一。1990年7月,中国四川梨子园隧道火灾的扑救便是封堵战术运用最成功的一起^[2]。而在封堵过程中,封堵高度对隧道火灾具有重要影响,要了解这些影响的具体作用和规律,需要进行大量的模拟与实验。

20 世纪以来,国内外学者针对不同通风条件、火源功率等因素,利用全尺寸、缩尺寸隧道模型对隧道火灾进行了大量的实验研究^[2-7]。同时,为了更加深入地研究隧道火灾,国内外学者针对不同的风速、燃料池尺寸等因素,利用相关计算机模拟软件对隧道火灾进行了一系列的模拟研究^[8-10]。21 世纪以来,隧道火灾形势严峻,针对隧道火灾的控制与扑救,国内学者也进行了大量的研究,例如贾定夺等人^[11]指出,通过封堵洞口并进行注水降温等方法可以有效地扑救隧道火灾;傅强^[12]提出了机器人灭火法,王戈等人^[13]提出了高速气体喷射灭火法。以上研究促进了对隧道火灾的进一步研究,并且为隧道火灾的扑救提供了可靠的参考数据。但针对封堵下的隧道火灾研究较少,仍需要进一步的研究。

在以上研究的基础上,为了研究了不同封堵率下的隧道火灾,本文通过火灾动力学模拟软件 FDS 对一个缩尺寸隧道在不同封堵高度下的火灾情况进行模拟,得到了不同封堵率下隧道内的温度分布及顶棚温度的变化规律,为隧道火灾的扑救提供一定的参考数据。

1 隧道火灾封堵灭火的数值模拟

1.1 隧道模型概况及参数设定

本文对隧道按一定的比例进行缩小,得到总长为 8 m、宽为 0.6 m、高为 0.8 m 的隧道模型,且隧道上部拱顶半径为 0.3 m,下部垂直壁面高为 0.5 m。其中,油盘面积为 60 cm × 30 cm,且油盘位于隧道模型中间。隧道采取自然通风的排烟方式,其通风口为两侧洞口。隧道的物理模型如图 1 所示。

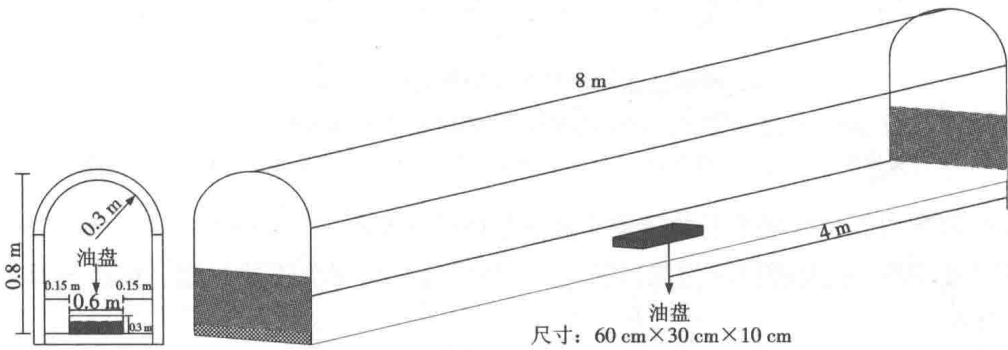


图 1 隧道模型示意图

Fig 1 Layout of the tunnel model

考虑到隧道火灾起火快、燃烧充足、燃烧过程中释放大量热量等特点,本文将一个油盘为火源时的热释放速率设为火源功率,约为 100 kW。因此,本模拟选取自蒸发燃烧模型,燃料为液态甲醇,密度为 790 kg/m³,导热系数为 0.2 W/(m · K),比热为 2.50 kJ/(kg · K),沸点为 65 °C,初始温度为 20 °C。为保证模拟工况的可靠性,结合火源功率对隧道模型进行网格划分,其中沿 X 方向划分 10 个网格,沿 Y 方向划分 100 个网格,沿 Z 方向划分 12 个网格。此外,模拟环境温度设为 20 °C。隧道内测点布置如图 2 所示,其中最上端测点与隧道顶棚及其下方测点的距离均为 0.05 m,其余测点的纵向距离均为 0.1 m。

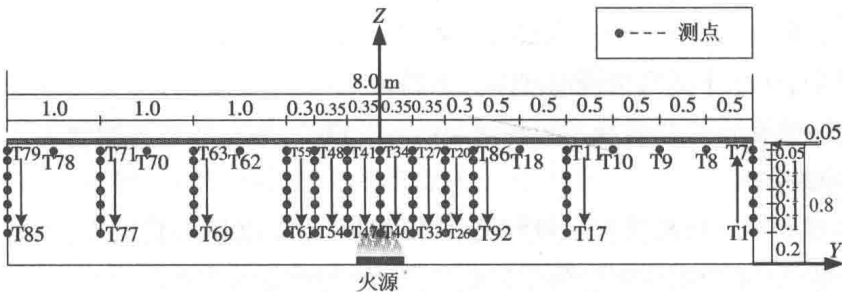


图 2 隧道内温度测点布置示意图

Fig 2 Layout of the measured points inside tunnel

1.2 隧道火灾模拟工况

本文在模拟隧道封堵时,对隧道两侧洞口采取同时封堵的方式,且在整个隧道火灾过程中,洞口的封堵率作为重要参数,影响着隧道内顶棚温度及烟气层的分布。本文根据封堵高度将封堵率分为0%、25%、50%、75%及100%五种情况,具体高度如图3所示。

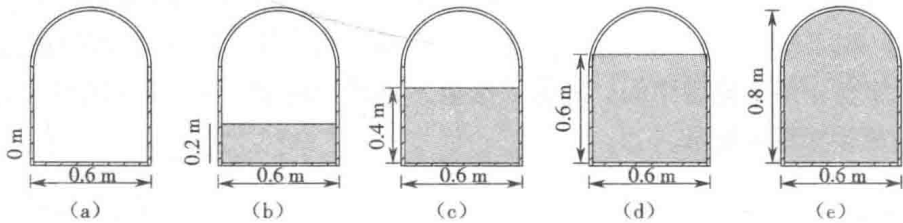


图3 不同封堵率下隧道洞口示意图

Fig 3 Layout of different sealing ratios

(a)封堵率0% (b)封堵率25% (c)封堵率50% (d)封堵率75% (e)封堵率100%

利用FDS对五种封堵率下的隧道火灾进行模拟。模拟时间为900 s,其中前300 s未采取封堵措施,300 s时对隧道两侧洞口进行对称封堵,且封堵为绝热封堵。模拟的具体工况如表1所示。

表1 隧道火灾模拟工况

Table 1 Experimental conditions set

工况	油盘个数	封堵率(%)	开始封堵时间/s
01	1	0	—
02	1	25	300
03	1	50	300
04	1	75	300
05	1	100	300

2 模拟结果与分析

2.1 不同封堵率下隧道顶棚温度的分布特征

图4至图6分别为不同封堵率下隧道洞口、隧道纵向半段中心及隧道中心处顶棚温度随时间的变化情况。

从图4至图6中可以看出,当封堵率为100%时,由于隧道口被完全封堵,新鲜空气无法进入隧道,隧道内的燃烧因氧含量不足而熄灭,造成隧道内各处顶棚温度均立即下降,且在短时间内降至环境温度。当封堵率为75%时,隧道内各处顶棚温度急剧下降,但其温度均高于完全封堵时隧道顶棚温度,其原因主要是当封堵率为75%时,隧道内的燃烧因新鲜空气的减少而受到抑制,但较高的封堵率使得隧道内产生的热烟气无法迅速从隧道口排出,部分热烟气聚积在隧道内使得隧道内温度无法迅速降至环境温度。当封堵率为50%

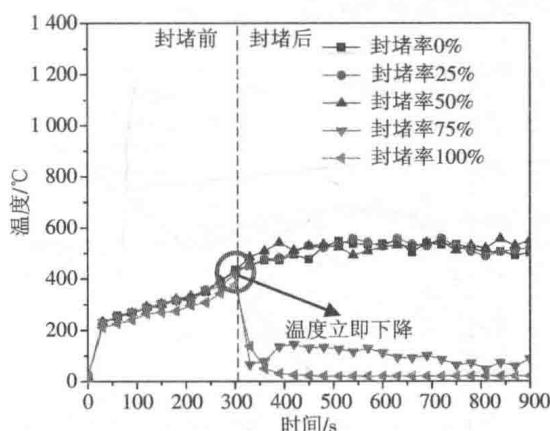


图4 不同封堵率下隧道洞口(T7)顶棚温度

Fig 4 Ceiling temperature of different sealing ratios at tunnel entrance (T7)

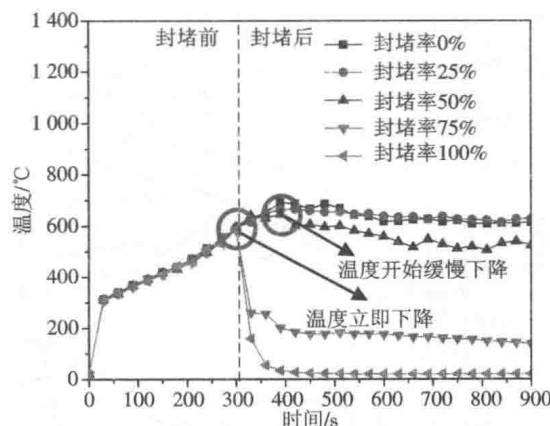


图5 不同封堵率下隧道纵向半段中心(T9)顶棚温度

Fig 5 Ceiling temperature of different sealing ratios at the half of tunnel center (T9)

时,隧道纵向半段中心和隧道中心处顶棚温度与未封堵时相比,均有小幅度下降,而洞口处顶棚温度趋势与未封堵时相比基本无变化。当封堵率为25%时,隧道内各处顶棚温度趋势与未封堵时相比并无明显变化,可见在此封堵率下,隧道内的氧含量仍能满足燃烧,隧道内燃烧并未受到隧道口封堵的影响。

此外,从图6中可以看出,当封堵率为75%时,隧道内的温度急剧下降,且在短时间内降至200℃左右。因此,结果表明,在实际的隧道火灾中,存在一个临界封堵率,当封堵率高于该临界值时,隧道内的燃烧将受到明显的抑制,且隧道内温度将在短时间内大幅度下降。

图7为600s时不同封堵率下沿隧道纵向顶棚处温度的分布,随着封堵率的增加,隧道内顶棚温度逐渐降低。此外,从图中可以看出,隧道内顶棚温度以火源为中心,沿两边呈下降趋势,而在洞口处却有小幅度的上升。在燃烧过程中,隧道内产生的热烟气会经过两侧洞口向外扩散,而当隧道洞口下方被部分封堵时,烟气只能通过上部开口处排出,使得洞口上部热烟气聚集。在模拟过程中,最靠近隧道顶棚处的测点距离顶棚仅有0.05m,从而造

成烟气经过洞口时洞口顶棚温度升高的现象。

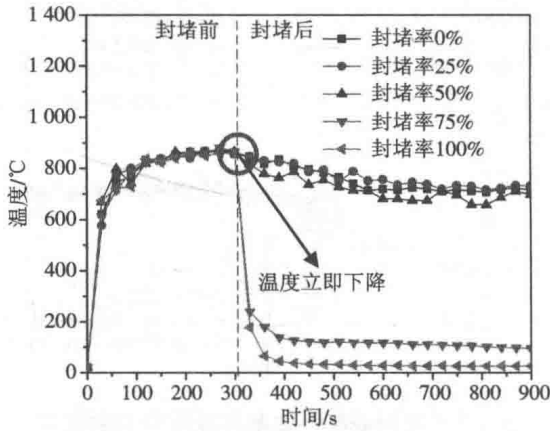


图6 不同封堵率下隧道中心(T34)顶棚温度

Fig 6 Ceiling temperature of different sealing ratios at tunnel center (T34)

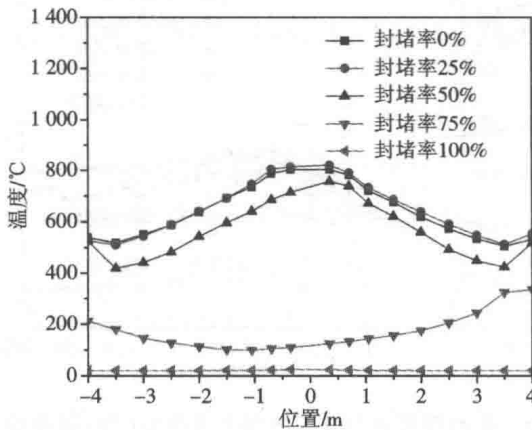


图7 600 s 时不同封堵率下隧道沿纵向顶棚温度分布

Fig 7 Ceiling temperature distribution along tunnel at 600 s

图8和图9为不同时刻、不同封堵率下距火源不同位置处顶棚温度的变化情况。360 s时,当封堵率为75%,距离火源1 m处的顶棚温度与未封堵时相比,相差了约540 °C;而距离火源4 m处的顶棚温度与未封堵时相比,仅相差220 °C。600 s时,当封堵率为75%,距离火源1 m处的顶棚温度与未封堵时相比,相差了约580 °C,而距离火源4 m处的顶棚温度与未封堵时相比,相差约190 °C。可见,在同一时刻距离火源位置越近,封堵率对隧道内烟气温度的影响越大;反之,距离火源位置越远,隧道内烟气温度受封堵率的影响也将越小。

2.2 不同封堵率下隧道内温度分布

根据隧道内各测点的测量数据,得到600 s时不同封堵率下隧道内烟气的温度分布云图,其具体分布如图10所示。本文定义温度高于750 °C的区域为高温区域。

由图10可知,当封堵率为25%时,从洞口进入隧道的新鲜空气仍能满足隧道内燃烧所需氧含量,因此隧道内的温度分布与未封堵时相比,无明显变化,且隧道内烟气层呈现出明

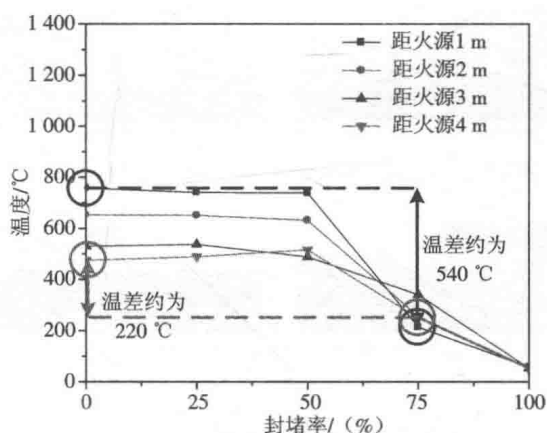


图8 360 s时隧道各点顶棚温度

Fig 8 Ceiling temperature inside tunnel at 360 s

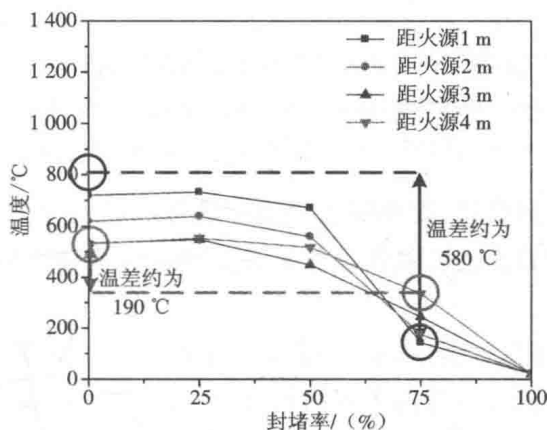


图9 600 s时隧道各点顶棚温度

Fig 9 Ceiling temperature inside tunnel at 600 s

显的分层现象;当封堵率为50%时,隧道内烟气层开始出现紊乱,且高温区域消失,可见在此情况下,从洞口进入隧道的空气量相对较少,隧道内的燃烧因氧含量较低而受到抑制;当封堵率为75%时,隧道内烟气层已无分层现象,且温度已基本降至250°C以下;当封堵率为100%时,隧道内燃烧已完全停止,且隧道已冷却至室温。

3 结论

本文对5种封堵率下的隧道火灾数值进行了模拟分析研究,通过对不同封堵率下隧道内顶棚温度及烟气分布特征的分析可知,在隧道火灾中,隧道内的燃烧受到氧含量及其热损失的影响,而这些都与封堵率密切相关。随着封堵率的增加,隧道内高温区域的面积逐渐减小直至消失,且烟气层分层逐渐紊乱。此外,在封堵的过程中,存在着一个临界封堵率,当封堵率低于该临界值时,由于进入隧道内的新鲜空气仍能满足隧道内燃烧所需氧含

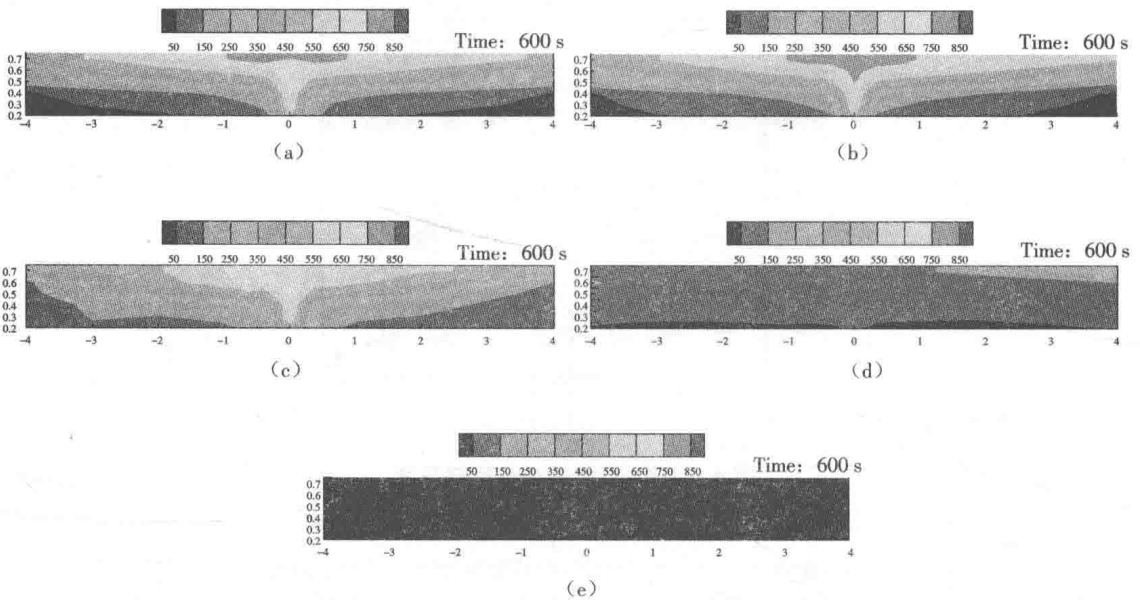


图 10 600 s 时不同封堵率下隧道内温度分布

Fig 10 Temperature distribution inside tunnel of different sealing ratios at 600 s

(a)封堵率0% (b)封堵率25% (c)封堵率50% (d)封堵率75% (e)封堵率100%

量,且加上热烟气在隧道内聚积,使得隧道内温度缓慢降低甚至无明显变化。而当封堵率高于该临界值时,隧道内的燃烧因氧含量不足而受到明显抑制甚至熄灭,使得隧道内的温度急剧下降。

在实际的隧道火灾扑救过程中,由于隧道口可能的破损将会导致洞口无法完全被封堵,而破损洞口的面积将影响隧道内火灾的发展趋势。因此,当破损洞口面积过大而使得隧道口封堵率低于临界封堵率时,采用封堵战术可能无法有效扑救隧道内的火灾,甚至造成更多的人员伤亡。

本文主要针对一个油盘为火源时不同封堵率下的隧道火灾进行了模拟,而在实际火灾发生时,隧道内火源面积较大,且可能存在多处火源。因此,针对大功率火源或多个火源情况下不同封堵率对隧道火灾行为特征影响的研究,将是今后的模拟研究的目标。

参 考 文 献

- [1] 刘鹏举,李刚,彭伟. 隧道火灾研究现状与发展[J]. 中国科技信息,2008,(2):35-36,38.
- [2] Yasushi Oka, Graham T Atkinson. Control of smoke flow in tunnel fires[J]. Fire Safety Journal, 1995, 25(4):305-322.
- [3] Hitoshi Kurioka, Yasushi Oka, Hiroomi Satoh, et al. Fire properties in near field of square fire source with longitudinal ventilation in tunnels [J]. Fire Safety Journal, 2003, 38(4):319-340.
- [4] 彭伟,霍然,胡隆华,等. 隧道火灾的全尺寸试验研究[J]. 火灾科学,2006,15(4):212-218.
- [5] J Ji, C G Fan, W Zhong, et al. Experimental investigation on influence of different transverse fire locations on maximum smoke temperature under the tunnel ceiling [J]. International Journal of Heat and Mass

- Transfer, 2012, 55(17-18):4817-4826.
- [6] Kashaf A, Yuan Z, Lei B. Ceiling temperature distribution and smoke diffusion in tunnel fires with nature ventilation [J]. Fire Safety Journal, 2013, 62(Part C): 249-255.
- [7] Yuan L M, Mainiero R J, Rowland J H, et al. Numerical and experimental study on flame spread over conveyor belts in a large-scale tunnel [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2014, 30(3): 55-62.
- [8] Vauquelin O, Mégret O. Smoke extraction experiments in case of fire in a tunnel [J]. Fire Safety Journal, 2002, 37(5): 525-533.
- [9] Chen F, Leong J C. Smoke flow phenomena and turbulence characteristics of tunnel fires [J]. Applied Mathematical Modelling, 2011, 35(9): 4 554-4 566.
- [10] 李炎锋,付成云,李俊梅,等. 城市交通隧道坡度对火灾烟气扩散影响研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2011, 7(5): 10-15.
- [11] 贾定夺,姬永兴. 隧道火灾快速扑救方法研究[J]. 武警学院学报, 2007, 23(2): 19-21.
- [12] 傅强. 隧道火灾的消防机器人系统[J]. 中国市场, 2006(22): 76.
- [13] 王戈,熊慧明. 针对隧道火灾的冷气溶胶灭火新方法研究[J]. 消防技术与产品信息, 2009(11): 26-28.