

文章编号: 1002-0268 (2004) 03-0060-04

公路隧道火灾情况下风压场变化的模型试验研究

王明年¹, 杨其新¹, 袁雪戡², 杨忠²

(1. 西南交通大学, 四川 成都 610031; 2. 陕西省公路局, 陕西 西安 710068)

摘要: 公路隧道发生火灾时, 对隧道安全构成威胁的是烟流和温度的扩散, 而烟流和温度的扩散速度主要依赖于风流速度, 影响风流速度的主要因素是风压。由于隧道火灾产生的烟流节流效应阻力、烟流摩擦阻力、烟流浮力效应的作用, 使隧道内风压发生很大的变化。因此, 研究风压的变化规律对救援和通风方案的制定有着极其重要的意义。

关键词: 公路隧道; 火灾; 风压场

中图分类号: U459.2

文献标识码: A

The Model Test on Ventilation Pressure Change in Highway Tunnel Fire

WANG Ming-nian¹, YANG Qi-xin¹, YUAN Xue-kan², YANG Zhong²

(1. Southwest Jiaotong University, Sichuan Chengdu 610031, China;

2. Shaanxi Province Highway Bureau, Shaanxi Xi'an 710068, China)

Abstract: The diffusion of smoke and temperature are serious danger for tunnel safety, when tunnel fire happen. The diffusion speed of smoke and temperature depend mainly on the tunnel ventilation velocity, and tunnel ventilation pressure is the major factor affecting tunnel ventilation velocity. The tunnel ventilation pressure will change, when smoke throttle resistance, smoke viscous force, smoke buoyancy are produced by tunnel fire. Therefore, It is very important to find out the regular pattern of tunnel ventilation pressure for rescue and the strategic decision of ventilation.

Key words: Highway tunnel; Fire; Ventilation pressure

0 概述

公路隧道在火灾情况下, 风流阻力将发生很大的变化, 这主要是由于烟流下工程通风、防灾及救援技术研究。节流效应阻力、烟流摩擦阻力、烟流浮力效应等综合作用的结果。

(1) 烟流节流效应阻力火灾过程中, 由于火焰的存在减小了火区隧道的有效过流断面积, 且风流在火区受热膨胀, 使风流流过火区的阻力较前一段隧道的风流阻力明显增加, 火区形成了一个局部阻力, 这个局部阻力就象一个节流阀作用于流过火区的烟流。这种由于燃烧火焰阻碍烟流在隧道中流动, 以及由于风流体积流量变化而产生的阻碍风流流动的现象, 称为

烟流节流效应阻力。

(2) 烟流摩擦阻力隧道火灾前后, 隧道内风流摩擦阻力有较大不同, 因为隧道内风流摩擦阻力与体积流量的平方以及烟流密度成正比。而火灾时, 隧道内的烟流密度、烟流速度是距离的函数。当隧道断面结构和面积不变时, 温度越高, 速度越大, 烟流摩擦阻力越大。

(3) 烟流浮力效应在倾斜的隧道中, 由于流动过程中烟流温度的不断下降, 烟流密度不断增加, 烟流位压也较火灾前风流位压发生很大的变化, 因而产生浮力效应, 形成对烟流的作用力。这种发生在倾斜隧道, 由于火灾前的风流与火灾时期的烟流密度不同而引起的对火灾烟流的附加作用, 称为火灾烟流的浮力

效应，习惯上称为火风压。

公路隧道发生火灾以后，其危害主要是由于烟流场和温度场扩散造成的，而烟流场和温度场的扩散速度主要依赖于风流速度，影响风流速度的主要因素是风压。因此，本文采用模型试验方法对火灾时隧道内风压场的变化规律进行了研究。

1 试验模型概况

试验场地约 4 000m²，试验隧道直径为 2.0m，长度 100m，按 1% 坡度设置，隧道结构材料为钢筋混凝土。试验设测量风压断面 3 个，见图 1。

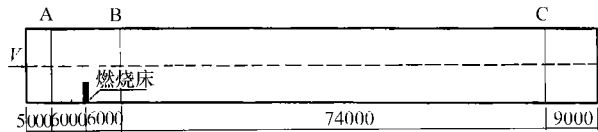


图 1 模型测试断面布置 (mm)

试验数据的采集采用了先进的 CAN 总线，所有测试数据由计算机自动采集。

为了模拟隧道的实际情况，进行了 2.0m/s、3.0m/s、5.0m/s 等不同风速的试验，风流方向由下坡向上坡方向流动。

本次模型试验的火灾规模考虑 A 级、B 级、C 级 3 种情况，它们分别为：

- (1) A 级：模拟 1 辆轿车着火 (60L 汽油)；试验采用 10L 柴油+1L 汽油+木材 15kg。
- (2) B 级：模拟 1 辆载重卡车着火 (150L 汽油)，试验采用 24L 柴油+1L 汽油+木材 30kg。
- (3) C 级：模拟 2 辆载重卡车 (包括两辆公共汽车) 相撞起火 (300L 汽油)；试验采用 48L 柴油+2L 汽油+木材 50kg。

2 试验结果分析

2.1 不同通风风速不同火灾规模下火区上游与火区下游全压差变化

定义火区上游 6m 和火区下游 80m 全压差为 $\Delta P_1 = P_{\text{上游}6\text{m}} - P_{\text{下游}80\text{m}}$ ，则不同通风风速不同火灾规模下火区上游与火区下游全压差随时间的变化规律分别列出图 2~图 5。

由图 2~图 4 可以看出：
(1) 在同等火灾规模情况下，随着风速的增加，火区上游 (6m) 和火区下游 (80m) 全压差逐渐减小。
出现这种情况的原因主要是烟流节流效应阻力、

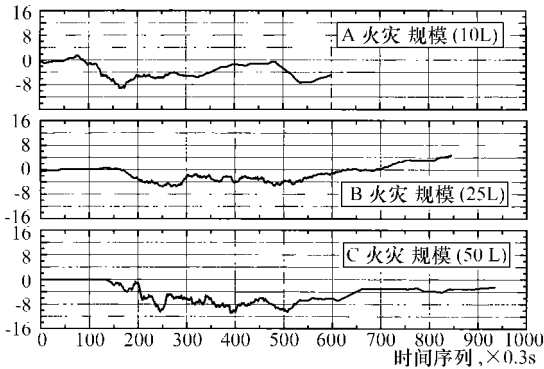


图 2 通风风速 2.0m/s 时火区上游 (6m) 和火区下游 (80m) 全压差 (Pa) 随时间变化

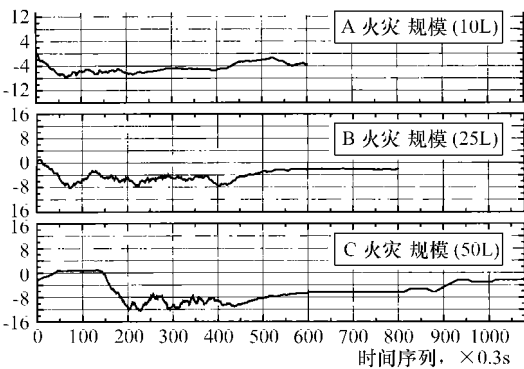


图 3 通风风速 3.0m/s 时火区上游 (6m) 和火区下游 (80m) 全压差 (Pa) 随时间变化

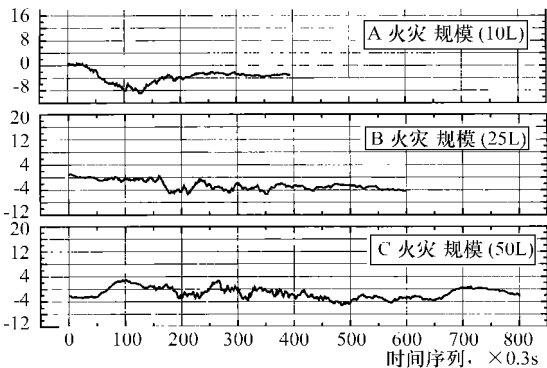


图 4 通风风速 5.0m/s 时火区上游 (6m) 和火区下游 (80m) 全压差 (Pa) 随时间变化

烟流摩擦阻力、烟流浮力效应综合作用的结果。在实验隧道内风速越大烟流节流效应阻力越小，因为风速增大后，火焰被吹倾斜，火焰占据隧道的断面积减少，同时火区温度也会降低，气体膨胀效应减小，所以烟流节流效应阻力减小；反之，则增大。由于风速增大，隧道沿程温度都会降低，而实验隧道长度一定，因此，隧道内烟流摩擦阻力和烟流浮力效应都会减小。所以出现在同等火灾规模情况下，随着风速的增加，火区上游 (6m) 和火区下游 (80m) 全压差逐

渐减小的情况。

(2) 在通风风速小于 3.0m/s 情况下，随着火灾规模的增大，火区上游（6m）和火区下游（80m）全压差有增大趋势。

这是因为在通风风速小于 3.0m/s 情况下，当实验隧道长度一定时，三种阻力中，烟流节流效应阻力是主要的，烟流摩擦阻力和烟流浮力效应是次要的。而烟流节流效应阻力在风速小于 3.0m/s 情况下，随着火灾规模的增大而增大。因为此时火焰占据隧道大部分面积，火灾规模越大，火焰占据隧道的断面积越大，火区内温度也越高，气体的膨胀效应也越大。所以，在风速较小时，随着火灾规模的增大，火区上游（6m）和火区下游（80m）全压差有增大趋势。

(3) 在通风风速大于 3.0m/s 情况下，随着火灾规模的增大，火区上游（6m）和火区下游（80m）全压差变化不大。

这是因为在通风风速大于 3.0m/s 情况下，如实验隧道长度一定，烟流浮力效应、烟流节流效应阻力、烟流摩擦阻力都是主要的，对于上坡隧道，烟流浮力效应是推动烟流的动力，而烟流节流效应阻力和烟流摩擦阻力是阻碍烟流的阻力。这三种力在这种情况下相互抵消，所以火区上游（6m）和火区下游（80m）全压差变化不大。

(4) 隧道火灾的燃烧过程极其不稳定。在高温火焰的作用下，液体燃料蒸发，同时固体燃料分解释放出挥发性易燃气体。这些易燃气体在上升过程中与空气混合而成为火焰，火焰在升腾时与周围空气发生剧烈的混合。因而，由于燃烧时火焰的升腾和紊动，隧道内的压力分布也呈现一种紊动的状态。可以发现，隧道内压力紊动的强弱与火灾规模（燃料的多少）以及火焰燃烧的剧烈程度有关。火灾规模越大，火焰燃烧越强烈，压力的紊动越强烈。火灾初期，随着火势的逐渐增大，压力的紊动逐渐增大，稳定阶段，压力的紊动也趋于稳定。当燃料逐渐燃完，随着火势逐渐减小，压力的紊动渐趋平缓。

2.2 不同通风风速不同火灾规模下火区下游不同断面全压差变化

定义火区下游 6m 和火区下游 80m 全压差为 $\Delta P_2 = P_{\text{上游}6\text{m}} - P_{\text{下游}80\text{m}}$ ，则不同通风风速不同火灾规模下火区下游不同断面全压差随时间的变化规律分别列出图 5~图 7。由图 5~图 7 可以看出：

(1) 在同等火灾规模情况下，随着风速的增加，火区下游（6m）和火区下游（80m）全压差有减小趋势。

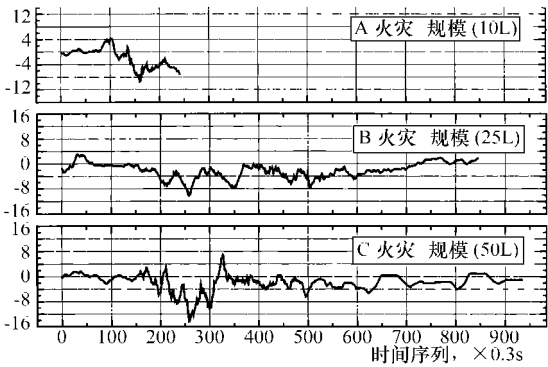


图 5 通风风速 2.0m/s 时火区下游（6m）和火区下游（80m）全压差（Pa）随时间变化

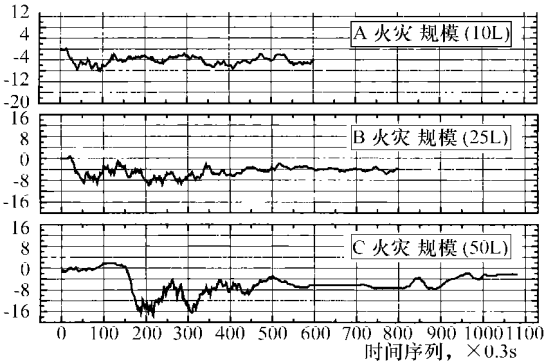


图 6 通风风速 3.0m/s 时火区下游（6m）和火区下游（80m）全压差（Pa）随时间变化

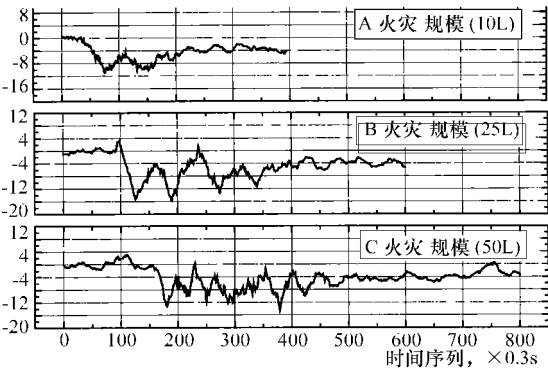


图 7 通风风速 5.0m/s 时火区下游（6m）和火区下游（80m）全压差（Pa）随时间变化

出现这种情况的原因主要是烟流摩擦阻力、烟流浮力效应综合作用的结果。由于风速增大，隧道沿程温度都会降低，而实验隧道长度一定，因此，隧道内烟流摩擦阻力增量和烟流浮力效应增量都会减小。所以出现了在同等火灾规模情况下，随着风速的增加，火区下游（6m）和火区下游（80m）全压差逐渐减小的情况。

(2) 在通风风速相同情况下，随着火灾规模的增大，火区下游（6m）和火区下游（80m）全压差有增

大趋势。

这是因为在通风风速相同情况下，当实验隧道长度一定时，则烟流浮力效应是主要的，烟流摩擦阻力是次要的。所以随着火灾规模的增大，火区下游（6m）和火区下游（80m）全压差有增大趋势。

3 结论

（1）在同等火灾规模情况下，随着风速的增加，火区上游和火区下游全压差逐渐减小。（2）在通风风速小于 3.0m/s 情况下，随着火灾规模的增大，火区上游和火区下游全压差有增大趋势。（3）在通风风速大于 3.0m/s 情况下，随着火灾规模的增大，火区上游和火区下游全压差变化不大。（4）隧道内的压力分布呈现一种紊动的状态，其紊动的强弱与火灾规模以

及火焰燃烧的剧烈程度有关。（5）在同等火灾规模情况下，随着风速的增加，火区下游一段隧道的全压差有逐渐减小趋势。（6）在通风风速相同情况下，随着火灾规模的增大，火区下游一段隧道的全压差有增大趋势。

参考文献:

[1] 王明年, 等. 秦岭终南山特长公路隧道网络通风研究 [J]. 公路交通科技, 2002, 19 (4).
[2] 王明年, 等. 隧道智能监控中心计算机系统 [J]. 公路交通科技, 2001, 18 (2).
[3] 王明年, 等. 秦岭终南山特长公路隧道防灾方案研究 [J]. 公路, 2000, 11.
[4] 韩昭沧. 燃料和燃烧 [M]. 冶金工业出版社, 2002
[5] 赵坚行. 燃烧的数值模拟 [M]. 科学出版社, 2002

（上接第 59 页）施，要考虑到软对策和硬对策是相辅相承、相互关联的关系，软性措施也是极其重要的。

（1）隧道管理方需要建立完善和有效的防救灾管理制度和政策，并切实地执行。同时就隧道及其设备的使用要通过各种途径向隧道使用者通告，以使人们熟悉这些设备，并能正确的使用。定期对隧道工作人员就火灾救援预案进行培训，使得每个人都清楚火灾时该如何处理。针对秦岭终南山特长公路隧道，因其设计安全等级为一级，可定期对隧道的安全状态进行检查和评估，并根据隧道的运营情况提出新的防火措施和方法。在获得基础火灾安全信息资料时可以通过以下设计的火灾安全检查表（Fire Safety Check List）进行获取，它是一种最基础的系统安全定性分析法。根据有关的防火安全规范、规定、标准和经验等，把要检查的项目、要点按一定顺序列成表格，作为检查的依据。根据检查隧道火灾的对象和目的的不同，火灾检查表可分为装运易燃易爆物品车辆防火安全检查表、隧道消防报警设施安全检查表、日常安全检查表、火灾隐患整改安全检查表等，样表如表 1。

防火安全检查样表 表 1

检查项目	检查内容	检查结果	检查日期	处理意见和措施
		(是打○ 否打×)		

（2）隧道使用者需要配合隧道管理方的指挥，遵守交通法规和隧道的交通管制，并通过隧道管理方提供的途径，熟悉隧道及其设备的使用。

（3）加强隧道防火工作的研究。
包括隧道火灾预防技术的研究，如防火花措施，

车辆阻燃、防火技术，隧道火险报警，隧道管理和保卫，以及隧道防火委员会和专门的专家监督机构设置等。隧道火灾救援技术的研究，如隧道特定条件下的燃烧理论及各种材料的燃烧条件、燃烧过程、燃烧特征，火灾烟气流的流动及热传导、辐射规律、火灾探测、报警、扑救技术，隧道通风排烟，消防救援，火灾条件下的通讯联络、人员安全疏散组织和防毒技术等。隧道火灾灾后修复处理的研究，如火灾事故调查的内容、方法及处理，隧道修复工程等。

4 结束语

通过对隧道火灾的分析，本文相关观点对我国隧道防火设计和消防救援有一定的指导意义。依照此火灾防灾救援安全策略制定详细的“长大公路隧道紧急消防执行预案”，让隧道的使用者和管理人员定期培训学习，一旦发生火灾，相关人员就能按照该预案进行处理。同时要在交通隧道设计、建造以及运营管理阶段都要贯彻防火意识。最大程度地解决地下交通隧道的安全问题，让地下交通的自身优势更充分地发挥出来。

参考文献:

[1] 杨其新, 等. 秦岭终南山特长公路隧道火灾救援技术研究报告 [D]. 西南交通大学, 2002 (10).
[2] Michael Vollmer 易北河隧道的新型防火系统 [R]. 隧道, 2001 (2).
[3] 李晓春, 等. 浅谈隧道机电工程 [J]. 公路, 2000 (1), 35—39.