

水平隧道火灾通风纵向临界风速模型

袁建平¹, 方正¹, 黄海峰², 唐智¹

(1. 武汉大学土木建筑工程学院, 武汉 430072; 2. 苏州科技学院环境科学与工程学院, 江苏苏州 215011)

摘要:火灾时的烟气控制在隧道防火安全设计中占有重要的位置,为此通过1/20小尺寸模型实验和全尺寸现场试验对水平隧道火灾通风纵向临界风速进行了研究。根据隧道全尺寸试验和小尺寸实验研究结果,并结合Jae等的小尺寸实验结果以及胡隆华的全尺寸试验和数值模拟结果,建立了水平隧道火灾通风纵向临界风速的预测模型。将模型得到的预测结果跟基于气体火源的实验结果进行对比,结果表明Wu和Barker通过气体火源小尺寸实验所建立的模型预测值偏低。

关键词:隧道;火灾;临界风速;通风;实验

中图分类号:U453.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2009)06-0066-05

Model of Critical Velocity for Fire Ventilation in Horizontal Tunnels

YUAN Jian-ping¹, FANG Zheng¹, HUANG Hai-feng², TANG Zhi¹

(1. School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, P. R. China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, Jiangsu, P. R. China)

Abstract: 1/20 scale model test and full scale field test were carried out to study the critical velocity for fire ventilation in horizontal tunnels. Combined with the test results, small-scale test results by Jae and full-scale test and simulation by Hu, a semi-empirical model was developed to predict the longitudinal critical velocity for tunnel fire ventilation. Compared with the predictions of the proposed model and other models using air as fire source, it was found that the predictions by Wu and Barker was underestimates.

Key words: tunnel; fire; critical velocity; ventilation; experiments

隧道火灾中的烟气逆流层直接威胁着火源上风区域的安全,关于烟气逆流层的研究主要涉及2个关键问题,即临界风速和逆流层的长度^[1]。临界风速就是刚好使得烟气逆流消失,烟气运动变为沿火源下游方向的完全单向蔓延的纵向风速^[2]。采用临界风速控制烟气的流动,既能防止上游回流的烟雾危害火源上游阻塞的车辆和行人,又能延长烟雾在隧道顶壁的贴附时间,避免烟雾在火灾下游扩散太长的距离,从而增加人员逃逸时间和安全性。

目前对于隧道临界风速的研究,主要采用的是实验和计算流体力学(CFD)模拟2种方法。从1979年开始,国外的研究者就开始利用小尺寸试验台上

对抑制隧道火灾烟气逆流的临界纵向送风风速进行了研究,得出在较小的热释放速率下,临界风速与热释放速率的1/3次方成正比,而当热释放速率大到一定程度时,临界风速与热释放速率无关^[3-5]。在临界风速的小尺寸实验研究中,最受关注的研究成果来自于英国的Y. Wu和M. Z. A. Bakar利用5个不同的试验台对临界送风风速值进行的研究,他们采用无量纲的速度和无量纲热释放速率以及隧道水力直径为特征长度,得到了临界风速的计算公式^[6]。但是其研究成果是基于气体火灾的小尺寸实验和量纲分析得到的,实验中气体火灾的热释放率基本上保持恒定不变而且其火焰更容易受纵向风的影响。

收稿日期:2009-06-17

基金项目:国家自然科学基金项目(50978206);武汉大学自主科研项目(5082007)

作者简介:袁建平(1980-),男,博士,主要从事隧道火灾安全及建筑人员疏散模拟研究,(E-mail)jpyuan@whu.edu.cn.

而事实上隧道中发生的大多数火灾都是油类物品在燃烧,因此以上研究结果对于隧道油类火灾的可信性还有待进一步验证。对此韩国的 Jae Seong Roh 等人^[7-8]采用小尺寸隧道模型对不同直径的庚烷油盘火进行了实验研究,其得到的临界风速要比 Wu 和 Bakar 的模型预测值要高很多,但其实验数据有限,无法推导出一个临界风速预测模型。此外国内外的很多研究者利用 CFD 模拟对水平隧道的临界风速进行了研究^[9-11],其中中国科学技术大学的胡隆华采用 FDS 对临界风速进行了模拟,并采用在实体隧道中进行的汽油火现场实验对 FDS 的模拟结果进行了验证,其结果也显示 Wu 和 Bakar 所建立的模型预测值低于实际的临界风速值。

由前面的分析可以看出,Wu 和 Bakar 基于气体火所建立的临界风速预测模型对油盘火的情况并不适用,该文在综合分析前人研究成果的基础上,通过油盘火小尺寸实验及全尺寸试验研究结果建立了水平隧道火灾通风纵向临界风速的预测模型。

1 水平隧道火灾小尺寸实验研究

1.1 实验设计和实验工况

实验研究是火灾科学研究中最基本也是重要的研究手段,采用适当的相似比,建立小尺度实验装置开展实验研究是一种经常采用的方法^[12]。根据隧道火灾模拟的相似准则^[7]建立了 1/20 比尺隧道小尺寸模型,隧道模型示意图如图 1 所示。该模型路面宽为 0.465 m,到拱顶的高为 0.322 m,长为 13 m,火源处由两段不锈钢圆筒组成,上下游各为有机玻璃圆筒。为了使得整个隧道断面的纵向风比较均匀,在火源上游入口 1 m 处设有进风格栅。实验中油盘放置在离上游入口 7.1 m 处的水平路面上,在火源上下游每隔一定距离设有直径为 1 mm 的铠装 K 型热电偶测点,一共有 24 个测点,其中有 4 棵热电偶树,热电偶布置如图 2 所示。顶部的热电偶位于隧道中心拱顶下方 5 mm 处,测点距离顶棚的距离为实验台高度的 1.5%,其测量的温度近似为顶棚下方烟气温度的最大值^[13]。其中第 1 号测点位于火源上游 2.75 m 处,第 23 号测点位于火源下游 4.5 m 处,一共使用了 3 个 ADAM 数据采集模块,共测量了火源上下游 7.25 m 范围内的温度,所有热电偶的冷端都集中在地面进行保护,测量误差不超过 2%。

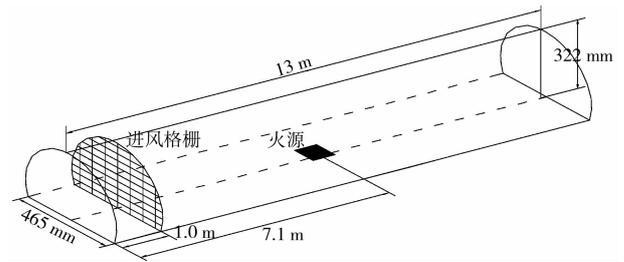


图 1 实验采用的小尺寸隧道模型图

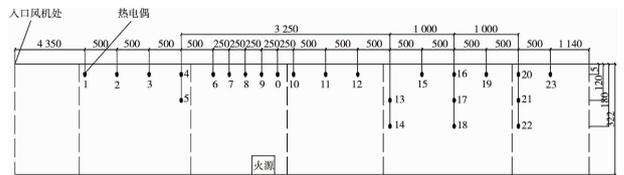


图 2 实验中热电偶布置图

为了不对隧道模型与实验室造成污染,故在实验中采用了纯度为 99% 的甲醇作为燃料。由于甲醇燃烧时不会产生明显的烟气,因此在实验中采用影视用烟饼以提供示踪烟气。实验中采用了 5 个不同尺寸的方形油盘,根据澳大利亚热烟测试标准中给出的甲醇火热释放速率曲线可以确定出各种尺寸燃料盘的热释放速率^[14],根据隧道火灾模拟的相似准则可得到对应的全尺寸火源功率如表 1 所示。实验中纵向风速采用德图热线式风速仪进行测量,每次取 1 min 的风速平均值。

表 1 实验油盘的火源功率

油盘尺寸/(cm×cm)	火源功率/KW	对应全尺寸火源功率/MW
7.5×7.5	1.976	3.535
10×10	3.563	6.374
10×15	5.427	9.708
15×15	8.327	14.896
15×20	11.345	20.295

1.2 实验结果分析

该研究的小尺寸实验中甲醇达到稳定燃烧的时间大概为 600 s,因此每次实验的燃烧时间为 1 000 s,点火 1 000 s 后将油盘火熄灭。根据实验中的温度数据来判断烟气回流的距离,对每个油盘尺寸先进行了 4 组不同纵向风速的实验,如果这 4 组实验中刚好有一组实验的风速使火源上游几乎没有温升,就将该风速作为临界风速。否则再根据这 4 组实验的烟气回流距离拟合一条曲线,从而得到回流距离为零时对应的风速,再在此风速下进行实验,

验证此风速是否为该火源功率下的纵向临界风速。图 3 为各个油盘在不同纵向风速 $V(m/s)$ 下沿隧道

纵向的温度分布图,其中各点温度为点火后 800~1 000 s 的温度时均平均值。

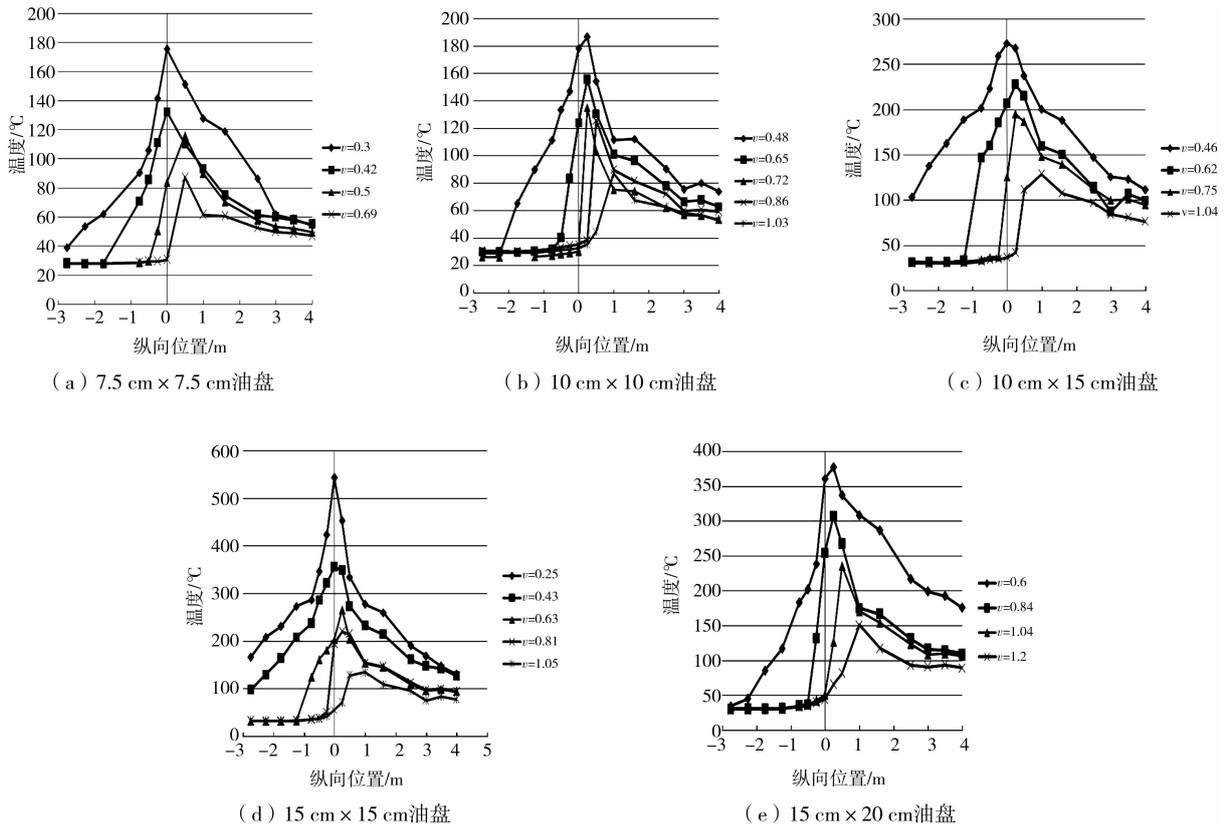


图 3 各油盘火在不同风速下的纵向温度分布图(位置负值表示火源上游)

从图 3 中可以看出,随着火源功率的增大,隧道内各点的温度越高,所需的纵向临界风速也越大,由实验结果分析得到各个油盘尺寸下的临界风速如表 2 所示:

入口照片和断面尺寸分别如图 4 和图 5 所示。

表 2 各油盘火下的纵向临界风速

油盘尺寸/(cm×cm)	纵向临界风速/(m·s ⁻¹)
7.5×7.5	0.5
10×10	0.65
10×15	0.75
15×15	0.81
15×20	0.84

2 隧道火灾全尺寸实验研究

除了开展小尺寸实验外,本研究还在湖北十堰高速公路上的龚家垭隧道开展了全尺寸的现场热烟实验^[15],该隧道为一座上、下行分离式的双向四车道山岭隧道,位于郧县青曲镇郧漫公路与东沟之间的龚家垭,隧道左线长 1 480 m,右线长 1 540 m。其



图 4 龚家垭隧道入口

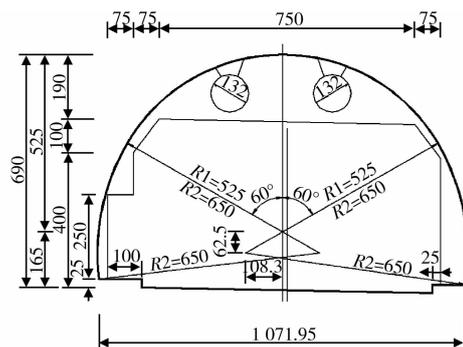


图 5 龚家垭隧道断面尺寸/cm

龚家垭隧道左右线采用的都是全射流纵向通

风,每条隧道在进口段约 100 m 处开始设置风机,共 3 组风机,每组 2 台,每组风机间距约 100 m,可根据需要按不同的组合方式开启风机。实验选在龚家垭隧道的右线内进行,火源位置设在右线离入口 800 m 左右的隧道中部,共进行了 2 次酒精热烟实验和 1 次汽油燃烧实验,实验中的火灾规模和测点的布置分别如表 3 和图 6 所示。

表 3 龚家垭隧道现场实验的火源设计

实验序号	油盘尺寸	燃料	火灾规模/MW
Test1	4 个 A1 油盘	95% 的工业酒精 每个油盘 20L	1.5
Test2	5 个 A1 油盘	93 汽油 每个油盘 20L	2.75
Test3	8 个 A1 油盘	95% 的工业酒精 每个油盘 20L	3

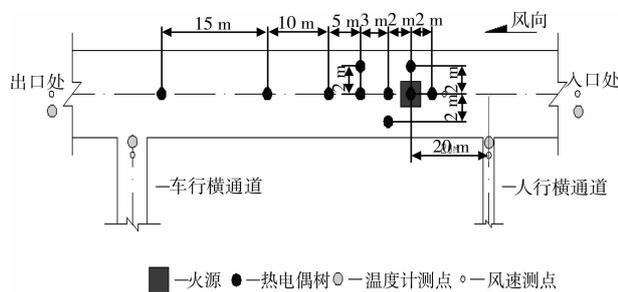


图 6 龚家垭隧道试验测点分布图

根据龚家垭隧道现场热烟实验 Test1 的烟气蔓延观测结果可知,在 1.5 MW 火灾规模下的纵向临界风速约为 1.5 m/s,根据现场汽油实验 Test2 和热烟实验 Test3 的烟气蔓延观测结果可知,在 3 MW 左右火灾规模下的纵向临界风速约为 2 m/s。

3 水平隧道火灾通风纵向临界风速模型

由前人的研究可知,必须将实验中热释放速率和纵向临界风速进行无量纲化后,所得到结果才会具有普遍适用性。在 Wu 和 Bakar 的隧道小尺寸研究中,引入了水力直径的概念,得到了如下的临界风速预测模型:

$$V''_c = 0.40 \cdot [0.20]^{-1/3} \cdot [Q'']^{1/3} \quad \text{当 } Q'' \leq 0.20 \quad (1)$$

$$V''_c = 0.40 \quad \text{当 } Q'' > 0.20 \quad (2)$$

式中 Q 和 V_c 分别为无量纲的热释放速率和无量纲的临界风速,由下式计算得出:

$$Q'' = \frac{Q}{\rho_a T_a C_p g^{1/2} H^{5/2}} \quad (3)$$

$$V''_c = \frac{V_c}{\sqrt{gH}} \quad (4)$$

式中 V_c 为临界风速, m/s; Q 为热释放速率, kW; g 为重力加速度, m/s^2 ; H 为隧道水力直径, m; T_a 是周围空气温度, K; ρ_a 空气密度, kg/m^3 ; C_p 为空气比热, $kJ/kg \cdot K$ 。

将该文的实验值、Jae 的实验值和 Hu 的实验和模拟值分别按式(3)和(4)进行无量纲转换,并与 Wu 的模型预测值进行对比,结果如图 7 所示。

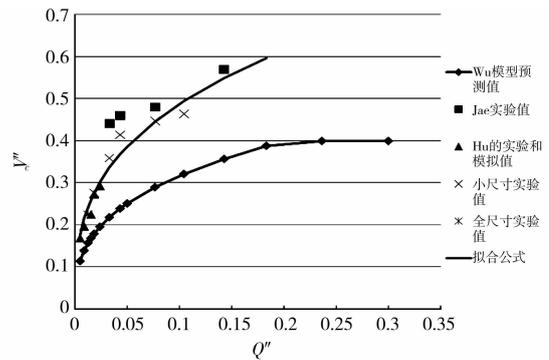


图 7 实验所得无量纲结果与其它研究结果的对比

从图 7 可以看出,无论是小尺寸还是全尺寸的实验结果都比 Wu 和 Barker 的模型预测值高,再次验证了通过气体火源小尺寸试验所建立的模型预测值偏低。根据该文开展的小尺寸和全尺寸实验的结果、Jae 的小尺寸实验结果、胡隆华的全尺寸实验和 FDS 模拟结果进行幂指数拟合,可得到如下的纵向临界风速预测公式,其拟合系数达到 0.88:

$$V''_c = 1.05 \cdot [Q'']^{1/3} \quad \text{当 } Q'' < 0.20 \quad (5)$$

由于以上 3 组实验中火源功率都没有特别大,因此无法验证是否油盘火功率达到一定大小后纵向临界风速值将不再变化,因此公式(5)的适用范围为无量纲热释放速率 $Q < 0.20$ 。从式(5)中可见看出,在较小的火灾规模下,纵向临界风速基本上与火源热释放速率的 1/3 成正比,这与前人的研究结论是一致的。

4 结 论

烟气逆流是隧道火灾内的一种特殊火灾现象,逆流烟气的存在将妨碍人员疏散和火灾扑救人员从上风向接近火场实施扑救。因此,研究抑制烟气逆流的临界纵向风速具有重要的工程意义。该文在综合分析前人研究成果的基础上,通过油盘火小尺寸

实验及全尺寸试验研究,建立了水平隧道火灾通风纵向临界风速的预测模型。主要结论如下:

1)由于采用气体火源的小尺寸实验中的热释放率基本上保持恒定不变而且其火焰更容易受纵向风的影响,Wu 和 Barker 所推导的临界风速预测模型对隧道中常见的油盘火下的临界风速预测值偏低。

2)根据所开展的隧道小尺寸和全尺寸实验结果,同时收集整理了韩国 Jae 的小尺寸实验结果、中科大胡隆华的 FDS 模拟结果和隧道全尺寸实验结果,由以上 3 组结果建立了水平隧道临界风速与火源热释放速率之间的无量纲拟合关系式,该关系式能较好的预测隧道油盘火下的临界风速值。

3)由于实验中所采用的最大无量纲火源热释放速率 Q 小于 0.2,因此所建立的预测模型的适用范围为 $Q < 0.20$,在以后的研究中需进一步开展更大火灾功率的实验研究,以验证是否油盘火功率达到一定程度后纵向临界风速值将不再变化。

参考文献:

- [1] 周延. 一个新的水平隧道火灾烟气逆流层长度模型研究[J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36: 569-572.
ZHOU YAN. A novel model for length of countercurrent smoke layer in horizontal tunnel fire[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2007, 36: 569-572.
- [2] BEARD A, CARVEL R. The handbook of tunnel fire safety[M]. London: Thomas Telford Ltd, 2005.
- [3] LEE CK, CHAIKEN RF, SINGER JM. Interaction between duct fires and ventilation flow: an experimental study[J]. Combustion Science and Technology, 1979, 20: 59-72.
- [4] OKA Y, ATKINSON G T. Control of smoke flow in tunnel fires [J]. Fire Safety Journal, 1996, 25: 305-322.
- [5] ATKINSON G, WU Y. Smoke control in sloping tunnels[J]. Fire Safety Journal, 1996, 27: 335-341.
- [6] WU Y, BAKAR M. Control of smoke flow in tunnel fires using longitudinal ventilation systems-A study of the critical velocity[J]. Fire Safety Journal, 2000, 35: 363-390.
- [7] JAE S, HONG S, DONG H. Critical velocity and burning rate in pool fire during longitudinal ventilation [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2007, 22: 262-271.
- [8] JAE S, HONG S, DONG H, et al. An experimental study on the effect of ventilation velocity on burning rate in tunnel fires-heptane pool fire case[J]. Building and Environment, 2008, 43: 1225-1231.
- [9] HWANG C C, EDWARDS J C. The critical ventilation velocity in tunnel fires-a computer simulation[J]. Fire Safety Journal, 2005, 40: 213-244.
- [10] KARIM V, BART M. Application of RANS and LES field simulations to predict the critical ventilation velocity in longitudinally ventilated horizontal tunnels [J]. Fire Safety Journal, 2008, 43: 598-609.
- [11] 胡隆华. 隧道火灾烟气蔓延的热物理特性研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2006.
- [12] QUINTIERE J G. Scaling applications in fire research [J]. Fire Safety Journal, 1989, 15: 3-29.
- [13] HITOSHI K, YASUSHI O, HIROOMI S, et al. Fire properties in near field of square fire source with longitudinal ventilation in tunnels [J]. Fire Safety Journal 2003, 38: 319-340.
- [14] Australian Standards 4391-1999. Smoke management system-Hot smoke test[S], 1999.
- [15] 谢丽霖. 高速公路隧道火灾现场试验与数值模拟研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2008.

(编辑 胡 玲)