

隧道火灾临界风速的理论计算与数值模拟

天津市市政工程设计研究院 李建兴[☆]
天津大学 李小江 邢金城 凌继红
天津市市政(公路)工程研究院 宋晓燕
天津市市政工程设计研究院 梁大坚

摘要 对比分析了国内外的相关文献资料,数值模拟了不同风速下火灾烟气的扩散情况,根据不同风速下烟雾的回流距离确定临界风速,对其取值提出了建议。

关键词 隧道通风 火灾 临界风速 数值模拟

Theoretical calculation and numerical simulation of critical air velocity in tunnel fires

By Li Jianxing[★], Li Xiaojang, Xing Jincheng, Ling Jihong, Song Xiaoyan and Liang Dajian

Abstract Compares and analyses relevant literature both domestic and abroad. Numerically simulates smoke flow at different air velocities. Based on the back flow distance of smoke at different wind velocities, determines the critical air velocity value.

Keywords tunnel ventilation, fire, critical air velocity, numerical simulation

★ Tianjin Municipal Engineering Design and Research Institute, Tianjin, China

①

1 引言及工程概况

隧道纵向通风系统的功能之一就是要保证火灾上游侧为无烟区,以备人员逃逸和火灾援救。图 1 为隧道射流风机纵向通风系统原理图。几乎所有的实验结果都表明,当隧道内存在较高的纵向风速时,可以将烟气控制在火源的一侧,但纵向风速过大时,不仅带来设备投资的增大,而且加强了气流的湍流程度,在较短的时间内破坏了烟气的分层贴附现象,使烟气较早降至路面,隧道断面提前充满烟气,对于处在着火点下游的人员和车辆极为不利。

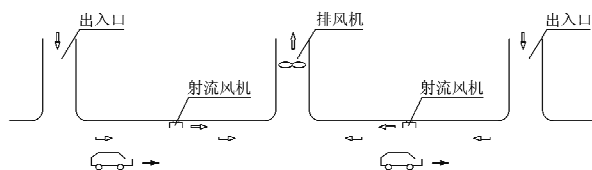


图 1 隧道射流风机纵向通风系统原理图

为避免产生回流现象,使火灾烟雾顺着下游方向扩散的最小风速称为临界风速^[1]。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,避免烟雾在下游扩散太长的距离,从而增加人员的逃逸时间和安全性。临界风速的确定已成为隧道通风系统设计中的关键问题之一。

某城市隧道工程(纵断面图见图 2)全长 2 883.4 m,呈南北走向,过河段采用沉管法施工工艺。其中,北侧 U 形槽长 225 m,南侧 U 形槽长

①☆ 李建兴,男,1972 年 10 月生,工学博士,高级工程师
300051 天津市和平区营口道 239 号
(0) 13512403462
E-mail: Ljx918@126.com
收稿日期:2008-05-08
修回日期:2009-04-08

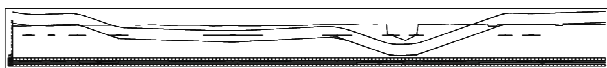


图2 隧道标准纵断面图(纵横比例为1:10)

250 m, 北侧封闭段长 1 843.4 m, 沉管段长 240 m, 南侧封闭段长 325 m。隧道为两孔一管廊, 双向 6 车道, 横断面面积 77.6 m²。

2 理论计算

临界风速的理论计算公式是基于 Froude 守恒理论与实验数据拟合得到的。通常被引用的公式模型是由 Heselden 和 Kennedy 提出的, 不同的参考文献给出了几种计算公式, 现针对不同的算法具体计算如下。

2.1 Heselden & Kennedy 公式^{[2]①}

$$V_c = k_g k \left(\frac{gHQ}{\rho_\infty c_p A T_f} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

$$T_f = \frac{Q}{\rho_\infty c_p A V_c} + T_\infty \quad (2)$$

式(1), (2)中 V_c 为临界风速, m/s; k_g 为坡度修正因数, 量纲一; k 为常数, 0.61; g 为自由落体加速度, 9.8 m/s²; H 为隧道截面净高, m; Q 为火源热量释放速率, W; ρ_∞ 为隧道内空气密度, 1.2 kg/m³; c_p 为空气比定压热容, 1 kJ/(kg · K); A 为隧道通风断面积, m²; T_f 为热气体温度, K; T_∞ 为环境温度, 300 K。

针对本工程, 以上各参数取值: $H=6.35$ m, $A=77.6$ m², $Q=20$ MW, $k_g=1.01$ 。用迭代法计算临界风速为 2.172 m/s。

2.2 Heselden & Kennedy 公式的修正式(当量直径法)^[3]

针对不同的隧道界面尺寸, Ris 建议式(1), (2)中的 H, A (特征值)换成当量值, 其表达式如下:

$$V_c = k_g k \left(\frac{g\bar{H}Q}{\rho_\infty c_p A_r T_f} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

$$T_f = \frac{Q}{\rho_\infty c_p A_r V_c} + T_\infty \quad (4)$$

式(3), (4)中 $\bar{H}$ 为隧道截面当量高度, m, $\bar{H}=4A/L$, 其中 L 为断面湿周长度, m; A_r 为隧道通风当量面积, m², $A_r = \pi \bar{H}^2/4$ 。

利用式(3), (4)计算的临界风速为 2.656 m/s。

2.3 量纲一公式

Oka 等人针对不同高度、不同宽度的 5 种隧道

断面, 通过试验及数值模拟对临界风速进行了研究, 引入量纲一热释放速率 Q^* 及量纲一速度 V^* , 计算式如下^[4]:

$$Q^* = \frac{Q}{\rho_\infty c_p T_\infty (gH^5)^{\frac{1}{2}}} \quad (5)$$

$$V^* = \begin{cases} k_v \left(\frac{Q^*}{0.12} \right)^{\frac{1}{3}} & Q^* < 0.12 \\ k_v & Q^* \geq 0.12 \end{cases} \quad (6)$$

式中 k_v 为常数, 一般可取 0.22~0.38。

量纲一速度 V^* 与临界风速的关系如下

$$V^* = \frac{V_c}{(gH)^{\frac{1}{2}}} \quad (7)$$

以上公式仅适用于相同高度、不同宽度隧道的临界风速计算, 即受隧道几何形状的限制。Wu Y 等人在此基础上, 将隧道高度用当量直径代替, 通过一系列实验, 给出如下公式^[5]:

$$Q^* = \frac{Q}{\rho_\infty c_p T_\infty (g\bar{H}^5)^{\frac{1}{2}}} \quad (8)$$

$$V^* = \begin{cases} 0.40 \left(\frac{Q^*}{0.20} \right)^{\frac{1}{3}} & Q^* \leq 0.20 \\ 0.40 & Q^* > 0.20 \end{cases} \quad (9)$$

式(9)中 $Q^* \leq 0.20$ 表示火灾热释放率较小。临界风速可通过下式计算得到:

$$V^* = \frac{V_c}{(g\bar{H})^{\frac{1}{2}}} \quad (10)$$

经计算得到临界风速为 2.795 m/s。

同济大学在试验的基础上对式(9)进行了再次修正^[6]:

$$V^* = \begin{cases} 0.64Q^{*\frac{1}{3}} & 0.00852 \leq Q^* < 0.102 \\ 0.287 & 0.102 \leq Q^* \leq 0.137 \end{cases} \quad (11)$$

根据上述计算, 得出本工程的临界风速为 2.615 m/s。

3 CFD 模拟

CFD 模拟的准确性取决于物理模型的准确性。用 CFD 来模拟和预测隧道火灾的可靠性已经被国外许多研究人员所证实。Woodburn 等人通过大量的实验、模拟数据对比, 并且与 Kumar, Cox

① Subway environmental design handbook. Vol II. Subway environment simulation (SES) computer program. Version 3. Part I: User's manual. U. S. Department of Transportation, October 1980

Zwenberg 和 Lea 的 Buxton Gallery Tunnel Fire 等全尺寸火灾实验数据进行比较,已经证实带有源项修正的标准 $K-\epsilon$ 湍流模型能很好地用来模拟火灾上下游的烟雾扩散^[7]。

通过数值计算模拟软件可以很好地模拟流体的运动及不同工况下的重要参数。利用不同风速下的烟雾的回流距离来确定临界风速,如果烟雾的回流距离为零,即没有回流发生时的控制风速即为临界风速。

3.1 几何条件和初始条件

隧道尺寸:200 m×6.35 m×13.125 m(长×宽×高);火源:模型尺寸 4 m×2 m×1.5 m(长×宽×高),发热量 20 MW,发烟量 35 kg/s;初始条件:在 $\tau=0$ 时,隧道内相对压力为 0 Pa,隧道内空气密度为 1.2 kg/m³,隧道内平均温度为 300 K,壁面摩擦阻力因数 $\lambda=0.0216$,隧道出口相对压力为 0 Pa(设当地大气压为 101 325 Pa)。

3.2 边界条件设置

隧道进口:等速边界条件(velocity-inlet);隧道出口:压力出口(pressure-outlet);火灾源:流体源项(fluid-source);烟气:木炭火(wood-volatiles-air);辐射模型:DO 模型(radiation-discrete ordinates);湍流模型:标准 $K-\epsilon$ 模型加全浮力效应修正。

3.3 模拟结果分析

当火灾热源发热量为 20 MW 时,分别模拟控制风速为 1.00,1.50,1.75,2.00,2.25 m/s 时的火灾烟气扩散情况。取烟雾浓度为 0.10 kg/m³ 的等浓度线作为是否发生回流和烟雾扩散距离的判断标准。隧道内火灾烟雾三维模拟结果如图 3 所示。

由图 3 可以看出,在不同控制风速下,烟气回流的不同程度。当风速为 2.25 m/s 时,隧道中间烟气回流距离近似为零。隧道中间基本无回流,因此把 2.25 m/s 作为控制火灾烟气的临界风速。不同控制风速下隧道顶部的烟气等浓度线对应的回流距离见表 1。

表 1 不同控制风速下的烟气回流距离

控制风速/(m/s)	回流距离/m
1.00	98
1.50	35
1.75	14
2.00	5
2.25	1

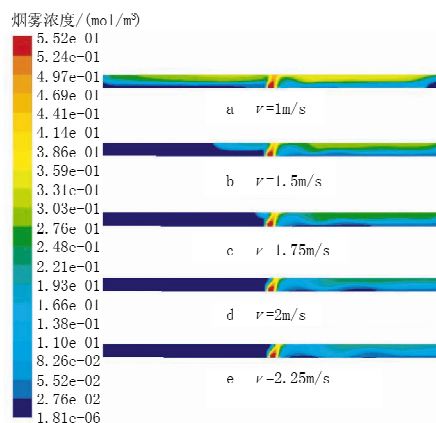


图 3 不同风速下火灾烟气分布云图

4 结论

综上所述,在理论值的求解过程中,根据不同的公式得出的 4 个不同的临界风速值略有差别,其值均在 2.1 m/s 以上;由于 CFD 模拟对隧道的截面进行了简化处理,忽略了隧道边角处的不规则性,20 MW 规模下的火灾临界风速与理论计算值略有出入。

从工程设计角度讲,采用经验公式计算得到的结果基本可以满足设计精度要求。

参考文献:

- [1] Wu Y, Bakar M Z A. A study of the effect of tunnel aspect ratio on control of smoke flow in tunnel fires [C]//10th International Conference on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, 2000
- [2] Kennedy W D, Parsons B. Critical velocity: past, present and future[C]//One Day Seminar of Smoke and Critical Velocity in Tunnels. London, 1996
- [3] De Ris J. Duct fires[J]. Combustion and Science Technology, 1970, 142(2): 239-258
- [4] Oka Y, Atkinson G T. Control of smoke flow in tunnel fires[J]. Fire Safety J, 1995, 25(4): 305-322
- [5] Wu Y, Bakar M Z A. Control of smoke flow in tunnel fires using longitudinal ventilation systems—a study of the critical velocity [J]. Fire Safety J, 2000, 35(4): 363-390
- [6] 徐琳, 张旭. 水平隧道火灾通风纵向控制风速的合理确定[J]. 中国公路学报, 2007, 20(2): 92-96
- [7] Woodburn P J, Britter R E. CFD simulation of a tunnel fire[J]. Fire Safety J, 1996, 26(1): 35-62