

# 隧道列车火灾的顶棚射流平均温度分布

毛 军<sup>1</sup>, 郝艳红<sup>1</sup>, 樊洪明<sup>2</sup>

(1. 北京交通大学 土木工程学院, 北京 100044; 2. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100022)

**摘要:**列车着火并停留在隧道内时,容易产生夹带火焰的顶棚射流。通过建立列车中部着火时火焰顶棚射流的一维单元控制体模型,考虑火焰烟气与隧道壁面和列车壁面之间的换热,导出列车火灾火焰顶棚射流平均温度的迭代计算公式。并通过隧道列车火灾的1:8缩尺模型实验和数值模拟计算,确定了迭代公式中的待定系数。由该公式经过迭代运算后得到的平均温度值与实测值吻合较好,最大误差不超过7%,验证了公式的可靠性。结果表明:列车上方和离开列车进入隧道的火焰顶棚射流的平均温度均沿隧道纵向呈指数形式变化,但变化的程度不同。通过分段拟合的方法,分别给出了两段顶棚射流的平均温度沿隧道纵向变化的预测公式。对隧道列车火灾的报警参数选择及装置设置、乘客安全疏散,以及分析火灾对隧道衬砌结构的破坏作用等均具有一定的参考价值。

**关键词:**隧道;列车火灾;温度;火焰;顶棚射流

**中图分类号:**U458.1    **文献标志码:**A    **文章编号:**1674-4764(2011)02-0086-06

## Average Temperature Distribution of the Ceiling Jet in Train Fires in Tunnels

MAO Jun<sup>1</sup>, XI Yan-hong<sup>1</sup>, FAN Hong-ming<sup>2</sup>

(1. The Civil Engineering of Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, P. R. China;

2. The College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, P. R. China)

**Abstract:** The flame ceiling jet is easily formed while the on-fire train stops in the tunnel. The iterative formula is derived to calculate the average temperature of the flame ceiling jet when the fire source is set on the center of the train by establishing a one-dimensional model of the unit control volume, and the heat exchange is considered among the flame smoke and the wall of the tunnel and the train. Undetermined coefficients in the iterative formula are determined by small-scale model experiments with the scale factor of 1:8 and numerical simulation. The calculated values of temperature by the iterative formula are consistent well with the measured values, and the maximum error of calculation is no more than 7%, which indicates that the iterative formula is reliable. The results show that the distributions of the average temperature of flame ceiling jet are in the exponential form, but there are some differences between that above the train and that in the tunnel. Two prediction formulas for the flame ceiling jet average temperature changing along the longitudinal tunnel are obtained by the sub-fitting method. The results can provide reference for the alarm parameter selection, device settings in tunnel, safety evacuation of the passenger, as well as the analysis of the destructive effects on the tunnel lining structure caused by tunnel fire.

**Key words:** tunnels; train fires; temperature; flame; ceiling jet

**收稿日期:**2010-08-15

**基金项目:**北京市自然科学基金重点资助项目(8101004); 国家科技部重大基础研究前期专项研究资助项目(2005CCA04700)

**作者简介:**毛军(1966-),男,博士,副教授,硕士生导师,博士生导师,主要从事安全技术与工程及流体力学与高速列车空气动力学研究,(E-mail)jmiao@bjtu.edu.cn.

在地铁隧道列车火灾中,由于列车和顶棚之间的空间较小,常常会形成夹带火焰的烟气羽流和顶棚射流,这一情形有时也出现在建筑走廊内的火灾蔓延过程中。对纯烟气羽流撞击顶棚的情况已有诸多研究<sup>[1-6]</sup>,但是对夹带火焰的烟气直接撞击顶棚的情况研究却很少。Hinkley 等人对夹带火焰顶棚射流的研究具有代表性<sup>[7]</sup>。他们将一个槽状容器倒置过来模拟建筑走廊,在槽道内靠一端的位置设置一多孔气体燃烧器,以富空气的城市煤气为燃料,通过实验得到了顶棚下的水平火焰长度的经验公式,但未对温度分布情况进行研究。而且,Hinkley 等人实验中的槽道类似于独头巷道的情形,与地铁隧道相比差距较大。毛军等<sup>[8]</sup>使用庚烷作为燃料,在地铁隧道列车火灾的1:8缩尺模型实验装置上进行燃烧实验,分析了列车中部着火时的火焰顶棚射流最高温度的变化规律。由于火焰顶棚射流的最高温度一般出现在隧道顶棚壁面附近,所以仅了解最高温度的变化规律而不掌握平均温度的分布规律,还难以对火焰向隧道和车体以及空气的传热进行分析,从而影响到人员疏散和应急救援方案的制定。此外,火焰顶棚射流现象易出现在地铁隧道列车火灾中,该文以地铁隧道列车中部着火为例,对其火焰顶棚射流的平均温度分布规律进行研究,以便为科学地实施隧道列车火灾的安全救援提供依据。

## 1 隧道内自由对流状态的火焰顶棚射流平均温度的理论预测

地铁列车顶部着火并停留在隧道内后,需要将地铁隧道通风系统由正常通风模式转变为防灾排烟模式。这一转变过程需要一定的时间。同时,从火灾报警到救灾决策,再到执行防灾排烟模式也需要一定时间。在排烟模式启动前,隧道内没有机械通风,隧道内的火焰和烟气处于自然扩展状态,火焰自然撞击隧道顶部壁面,形成沿隧道纵向扩展的自由火焰顶棚射流。在列车顶部到隧道顶部的空间内可能出现火焰和烟气共存的情况。在火焰层和烟气层内,各层高度方向上的温度近似均匀分布。但在隧道长度方向,由于列车和隧道的壁面与火焰和热烟气的相互作用,温度是逐渐变化的。因此,需要分析温度沿隧道纵向的平均温度的变化规律。图1是地铁隧道内列车中部着火时顶棚射流的二维非稳态模型,火焰和烟气与隧道壁面和列车壁面之间呈自然对流状态。

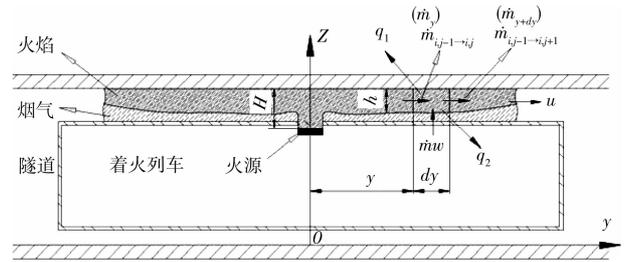


图1 地铁隧道列车火灾的火焰顶棚射流模型

图1中, $y$ 是离火源中心线的坐标, $dy$ 是单元控制体的纵向长度, $m$ , $H$ 是火源的火焰底面到隧道顶棚的距离, $m$ , $h$ 是 $y$ 处单元控制体的高度, $m$ ;  $u$ 是火焰烟流的纵向蔓延速度, $m/s$ ,  $\dot{m}_{i,j-1 \rightarrow i,j}$ 和 $\dot{m}_{i,j \rightarrow i,j+1}$ 分别是纵向流入和流出单元控制体的质量流量, $kg/s$ ,  $\dot{m}_w$ 是火焰区单元体所卷吸的气体质量流量, $kg/s$ ;  $q_1$ 、 $q_2$ 分别是火焰烟流对隧道壁面和列车壁面的热交换功率, $kW$ ,各包括对流热和辐射热两部分。火焰与烟气的温度较接近,它们之间的热扩散较小,这里忽略不计。同时,为了分析火焰和烟气沿隧道纵向的温度变化规律,只考虑火源功率和烟流温度都最终达到稳定状态的情况,做如下假设<sup>[4]</sup>:

- 1) 隧道火焰和烟气的密度仅随温度变化,隧道内压力变化不大,气体状态按等压过程处理。
- 2) 隧道内的火焰和烟气的宽度沿纵向近似不变(在后面的模型实验中可以观察到)。
- 3) 列车上方的火焰卷吸的空气量较小,火焰与烟气有明确稳定的分界面。
- 4) 按恒定火源考虑,即热释放速率不随时间变化。
- 5) 燃烧稳定后,夹带火焰的烟流的温度不随时间变化,这在实验中得到了验证。

6) 引入双层区域模拟思想,假定火焰层和烟气层内在高度方向的热物性均匀一致,对高度方向上的热物性参数进行平均化处理,即在任意 $y$ 处的火焰层和烟气层内,密度和温度与该处的高度无关。

根据上述假设,在火焰区选取尺寸为 $B \times dy \times h$ 的微元控制体, $B$ 是控制体的宽度( $x$ 方向), $m$ , $h$ 是厚度, $m$ 。控制体内的火焰应满足连续性方程和能量方程,即:

$$\text{连续性方程, } \dot{m}_{y+dy} - \dot{m}_y = \dot{m}_w \text{ 或 } d\dot{m} = \rho_a \omega_c B dy \quad (1)$$

$$\text{积分得, } \dot{m} = \dot{m}_0 + \rho_a \omega_c B y \quad (2)$$

$$\text{能量方程, } d(c_p \dot{m} T_f) = c_p \rho_a \omega_c B dy T_0 - (q_1 + q_2) \quad (3)$$

其中, $\rho_a$ 是环境空气的密度, $kg/m^3$ ;  $T_0$ 是环境空气的温度, $K$ ;  $c_p$ 是定压比热常数, $J/(kg \cdot K)$ ;随温度

变化;  $w_e$  是水平卷吸速度, m/s;  $T_f$  是火焰层的平均温度, K;  $q_1$  和  $q_2$  分别是与隧道壁面和列车壁面之间的热交换功率, kW;  $\dot{m}_0$  是初始质量流量, kg/s; 设隧道壁面和列车表面的温度分别为  $T_1$  和  $T_2$  (单位为 K), 则有:

$$q_1 + q_2 = dA_1\alpha_1(T_f - T_1) + dA_2\alpha_2(T_f - T_2) = [L_1\alpha_1(T_f - T_1) + L_2\alpha_2(T_f - T_2)]dy \quad (4)$$

其中,  $L_1$  和  $L_2$  分别是过流断面上烟气与隧道和列车的壁面接触的周长(即湿周),  $dA_1$  和  $dA_2$  分别是与隧道和列车壁面的接触面积, 表面换热系数  $\alpha$  包括对流与辐射 2 部分的系数,  $\alpha = \alpha_c + \alpha_r$ 。

### 1.1 对流换热系数的计算

对流换热系数:  $\alpha_c = N_u k / D$ ,  $W / (m^2 \cdot K)$

$N_u$  是平均的努塞尔数, 火焰和烟气流经隧道和列车的顶面, 按水平平板自然对流考虑<sup>[6]</sup>:

冷表面向下,  $N_u = 0.15R_a^{1/3}$  (湍流,  $2 \times 10^7 \leq R_a \leq 3 \times 10^{10}$ );  $N_u = 0.54R_a^{1/4}$  (层流,  $10^5 \leq R_a \leq 2 \times 10^7$ );

冷表面上,  $N_u = 0.27R_a^{1/4}$ ,  $10^5 \leq R_a \leq 10^{10}$

$$\text{瑞利数 } R_a = P_r \cdot G_r = \frac{\nu}{a} \cdot \frac{g\beta(T_f - T)D^3}{\nu^2}。$$

其中, 热扩散系数  $a = k / (\rho \cdot c_p)$ ,  $m^2 / s$ ; 热胀系数  $\beta = 1 / T_f$ ,  $K^{-1}$ ;  $g$  是重力加速度, 取为  $9.8 m / s^2$ ;  $D$  是隧道或列车顶部平面的特征尺寸, 为平板的面积与周长之比, m;  $T$  是壁面温度, K;  $k$  是空气的导热系数,  $W / (m \cdot K)$ ;  $P_r$  是普朗特数;  $G_r$  是格拉晓夫数;  $\nu$  是气体的运动粘度,  $m^2 / s$ ;  $a$  是热扩散系数,  $m^2 / s$ ;  $c_p$  是定压比热常数,  $J / (kg \cdot K)$ ;  $\rho$  是密度,  $kg / m^3$ ; 可根据文献[9]的数据得到回归曲线  $k(T_f)$ 、 $P_r(T_f)$ 、 $\nu(T_f)$ 、 $a(T_f)$ 、 $c_p(T_f)$  及  $\rho(T_f)$ 。由此可知, 表面对流换热系数与气体的温度有关。对于自然对流, 典型的  $\alpha_c$  值介于  $5 \sim 25 W / (m^2 \cdot K)$ <sup>[10]</sup>。后面的实验和数值计算表明, 相同温度下的隧道和列车的平均表面换热系数相近, 它们的平均值可视为常数。

### 1.2 辐射换热系数的计算

$$\text{隧道表面辐射换热系数: } \alpha_{1r} = \frac{\epsilon_r \sigma (T_f^4 - T_1^4)}{(T_f - T_1)}, \quad W / (m^2 \cdot K) \quad (5)$$

$$\text{列车表面辐射换热系数: } \alpha_{2r} = \frac{\epsilon_r \sigma (T_f^4 - T_2^4)}{(T_f - T_2)}, \quad W / (m^2 \cdot K) \quad (6)$$

$$\text{表面总吸收系数}^{[11]}: \epsilon_r = \frac{1}{1/\epsilon_g + 1/\epsilon_s - 1}$$

$$\text{烟气辐射率(黑度): } \epsilon_g \approx 0.8^{[12]}$$

壁面辐射率:  $\epsilon_s = 0.8 \sim 0.9$ <sup>[13-14]</sup>, 计算时取平均值

$$\text{热辐射常数: } \sigma = 5.67 \times 10^{-8} W / (m^2 \cdot K^4)$$

### 1.3 隧道和列车壁面与火焰烟流的热交换

将 1.1、1.2 中各项代入式(4)中得:

$$q_1 + q_2 = [\alpha_c(L_1 + L_2)T_f + \epsilon_r \sigma(L_1 + L_2)T_f^4 - \alpha_c(L_1T_1 + L_2T_2) - \epsilon_r \sigma(L_1T_1^4 + L_2T_2^4)]dy \quad (7)$$

式中, 壁面温度  $T_1$ 、 $T_2$  与热烟流温度  $T$  有关。由后面的实验和数值模拟计算可知, 自然对流换热的热交换功率小于辐射换热的热交换功率; 隧道壁面温度与夹带火焰的烟流温度的比值为常数, 设为  $\varphi_1$ ; 列车表面温度与烟流温度的比值也为常数, 设为  $\varphi_2$ , 则有:  $T_1 = \varphi_1 T_f$ ,  $T_2 = \varphi_2 T_f$ 。将它们代入式(7)可得:

$$q_1 + q_2 = (\psi_1 T_f + \psi_2 T_f^4) dy \quad (8)$$

$$\text{其中, } \psi_1 = \alpha_c(L_1 + L_2 - L_1\varphi_1 - L_2\varphi_2); \psi_2 = \epsilon_r \sigma(L_1 + L_2 - L_1\varphi_1^4 - L_2\varphi_2^4)$$

将式(8)代入式(3)中可得:

$$d(c_p \dot{m} T_f) = c_p \rho_a w_e B T_0 dy - (\psi_1 T_f + \psi_2 T_f^4) dy$$

$$\text{或 } \frac{d}{dy}(c_p \dot{m} T_f) = c_p \rho_a w_e B T_0 - \psi_1 T_f - \psi_2 T_f^4 \quad (9)$$

将式(9)的左边展开:

$$c_p \dot{m} \frac{dT_f}{dy} + c_p \dot{m} \frac{dT_f}{dy} = c_p \rho_a w_e B T_0 - \psi_1 T_f - \psi_2 T_f^4 \quad (10)$$

将式(1)代入式(10)可得:

$$c_p \dot{m} \frac{dT_f}{dy} = c_p \rho_a w_e B T_0 - c_p \rho_a w_e B T_f - \psi_1 T_f - \psi_2 T_f^4$$

$$\frac{dT_f}{c_p \rho_a w_e B (T_0 - T_f) - \psi_1 T_f - \psi_2 T_f^4} = \frac{dy}{c_p (\dot{m}_0 + \rho_a w_e B y)} \quad (11)$$

而  $\dot{m}_0 = \rho u B h$ ,  $w_e = \beta u$ , 卷吸常数  $\beta = 0.00015$ <sup>[15]</sup>, 可见, 相对于隧道火灾烟流的质量流量而言, 卷吸速度  $w_e$  很小, 火焰烟流的水平卷吸质量较少, 对能量交换的贡献也较小, 所以式(11)可以简化为:

$$\frac{dT_f}{-\psi_1 T_f - \psi_2 T_f^4} = \frac{dy}{c_p \dot{m}_0} \quad (12)$$

积分求解得:

$$\frac{1}{\psi_1} \ln \left( \frac{T_f}{\sqrt[3]{\psi_1 + \psi_2 T_f^3}} \right) = - \frac{1}{c_p \dot{m}_0} y + C_0$$

$C_0$  为待定参数, 代入初始条件:  $y = 0$ ,  $T_{y=0} = T_m$  (即火源正上方的平均温度, 近似为火焰温度), 从而得  $C_0 = \frac{1}{\psi_1} \ln \left( \frac{T_m}{\sqrt[3]{\psi_1 + \psi_2 T_m^3}} \right)$ , 于是有  $\frac{T_f}{\sqrt[3]{\psi_1 + \psi_2 T_f^3}} = e^{-\frac{\psi_1}{c_p \dot{m}_0} y + C_0 \psi_1}$ , 由此解得:

$$T_f = \left[ \frac{\psi_1 \exp\left(-\frac{3\psi_1}{c_p m_0} y + 3C_0 \psi_1\right)}{1 - \psi_2 \exp\left(-\frac{3\psi_1}{c_p m_0} y + 3C_0 \psi_1\right)} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (13)$$

式(13)为无机械通风条件下,火焰顶棚射流流平均温度的纵向变化规律。其中,  $\psi_1$ 、 $\psi_2$  是组合系数,它们以及  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $\varphi_1$ 、 $\varphi_2$ 、 $u$ 、 $h$ 、 $B$ 、 $T_1$ 、 $T_2$  和典型位置的  $T_f$  等需通过实验和数值模拟得到。

## 2 列车火灾的火焰顶棚射流的模型实验

通过 1:8 缩尺比例的模型实验和相似性分析可研究隧道列车火灾中夹带火焰的烟气顶棚射流的温度特性。模型实验中,不开启机械通风系统。隧道内的烟气流动是燃料燃烧产生的热量驱动的,即在隧道列车火灾中,浮力效应起主导作用,火源附近的烟气流动为重力流。因此,采用弗劳德准则作为相似准则<sup>[16]</sup>。

$$\text{弗劳德数: } F_r = V_f / (gL_f)^{1/2} = V_m / (gL_m)^{1/2}$$

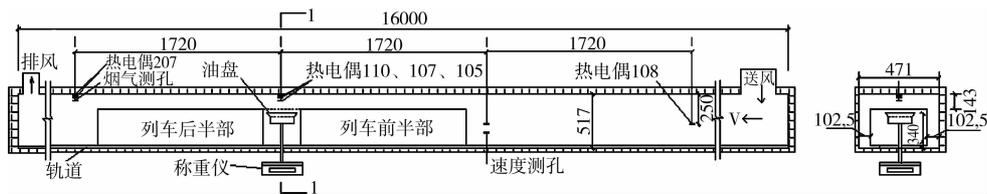


图2 地铁隧道模型的几何结构及测点布置图(几何尺寸单位:mm)

采用质量损耗率法测定热释放速率:  $Q = \dot{m} \Delta H$ 。其中,  $\varphi$  为可燃物的燃烧效率,与可燃物种类及燃烧状况有关。正庚烷在供氧充足条件下的  $\varphi = 93\%$ 。 $\dot{m}$  为质量损失速率,将支承油盘的支架安装在电子天平上,电子天平实时监测燃料质量随时间的变化情况;采样间隔为 10 s,燃烧时间 2~10 min,由此换算得到  $\dot{m}$ 。 $\Delta H$  为可燃物的热值,正庚烷的燃烧热值为 48.24 kJ/g。经过计算,燃料用量为 100、150、200 和 250 mL 时,在模型隧道中完全燃烧所需的氧气充足,故取  $\varphi = 93\%$ ,相应的热释放速率分别为 28.31、33.53、38.22、38.66 和 42.98 kW。实测的温度值将在后面与数值模拟的结果进行比较。

## 3 火焰顶棚射流的数值模拟

由于温度测点有限,为了获得隧道火灾的详细信息及更多的温度数据,对隧道列车火灾中夹带火焰的烟气顶棚射流进行数值模拟计算。并与模型实验中不同热释放速率、不同断面处的温度进行了对比分析。

### 3.1 数值模拟条件的设定

采用 PHOENICS3.6 软件,按实验模型中的相应尺寸建模进行数值模拟计算。计算域的尺寸为

$$\text{速度关系: } V_m = V_f (L_m/L_f)^{1/2}$$

$$\text{时间关系: } t_m = t_f (L_m/L_f)^{1/2}$$

热释放速率关系:  $Q_m = Q_f (L_m/L_f)^{5/2}$  (温度比例尺确定为 1,即  $T_f = T_m$ )

由于实际地铁隧道火灾的热释放速率一般为 0~5~10 MW<sup>[17]</sup>,利用相似关系可以换算出模型隧道火灾的热释放速率应为 0~27~55 kW,因此,燃料采用庚烷,燃料用量分别为 100 mL、150 mL、200 mL、250 和 350 mL,油面距离隧道顶面的高度均为 200 mm,列车的尺寸为 260 mm×3 000 mm×350 mm。模型隧道的几何结构尺寸、模型列车的位置及各物理量测点的布置如图 2 所示。编号分别为 110、107、105、108 和 207 的温度测点离隧道顶的距离分别为 25、50、100、250 和 350 mm,温度测量采用直径为 0.2 mm 的 K 型铠装铜—康铜热电偶,其外层是直径为 1 mm 的不锈钢包层,精度 0.1℃。

556 mm×8 640 mm×627 mm,划分为 18 200 个控制容积,火源处及环形空间处的网格加密,如图 3 所示。(X, Y, Z)和(x, y, z)分别是数值模拟和温度分析的坐标系。模型实验中燃料的燃烧时间一般在 200 s 左右,故数值模拟的时间取为 206 s。时间采用均步,共分为 10 步,每 20.6 s 一步,内迭代次数为 1 500。计算各点的速度分量  $u$ 、 $v$ 、 $w$ ,压强  $P$ ,温度  $T$ ,烟气质量浓度  $C$ ,湍流动能  $k$  和湍流动能耗散率  $\epsilon$  等。

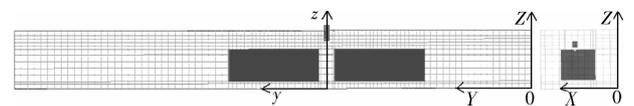


图3 列车中部着火模拟计算的纵断面和横断面的网格图

初始条件:假定在初始时刻( $t=0$ )隧道内压强  $P=P_0$ ,速度分量  $u=0$ 、 $v=0$ 、 $w=0$ ,温度  $T_0=289$  K,烟气质量浓度  $C=0$  在火源处,烟气质量浓度  $C=0.05$ ;火源功率按照实验计算得出的数值进行设定。

边界条件:隧道进口,给出速度条件,初始速度为 0,温度  $T=16$ ℃,烟气浓度为 0;隧道出口,给出压力条件,出口边界使用充分发展条件,即在出口断面上的节点参数值对于出口边界内侧最邻近节点参数无影响。

隧道壁面:在隧道围护结构固体壁面及列车侧壁

表面上,速度分量均采用无滑移边界条件。隧道及列车壁面均采用钢质材料,壁面函数采用对数壁面率,粗糙度均取为 0.013 mm,辐射系数设为 0.85。

烟气介质所含颗粒群的吸收率和散射系数比气体大得多,可近似视为灰体,吸收率等于辐射率,为 0.77;散射系数为 0.23,辐射换热模型选用 IMMERSOL 模型<sup>[18]</sup>。

### 3.2 温度实测数据与数值模拟计算结果的对比分析

对燃料用量分别为 100 mL、150 mL、200 mL、250 mL 时的温度进行模型实验和数值模拟,结果表明:烟气层温度时变规律的实测值与数值模拟值基本吻合,火源上方温度测点 110、107、105 的最大误差分别为 6%、5%和 19%,最小误差分别为 0%、1%和 0%。列车前后方温度测点 108 和 207 的最大误差分别为 35%和 12%,最小误差分别为 2%和 1%;平均误差分别为 20%和 8%。温度测点 108 远离火源而靠近进风口,温度较低,在 15~30℃之间,测量误差较大。而在高温区的温度测点的测量误差均较小。可以认为在各种火灾工况下,火焰温度的数值模拟结果可信。图 4、图 5 给出了各个测点(其位置参见图 2)温度时变曲线的实测与数值模拟结果的对比情况。因此,通过数值模拟获取温度分布数据,以便结合实验数据更准确地确定平均温度的迭代公式中的待定系数。

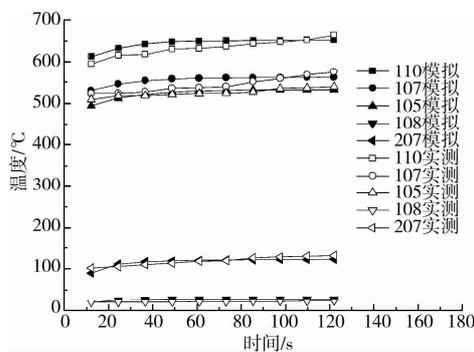


图 4 燃料 150 mL 的温度时变曲线—实测与模拟比较

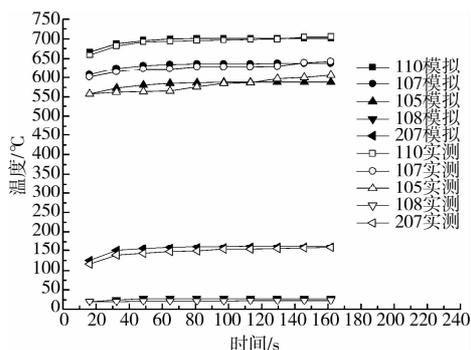


图 5 燃料 200 mL 的温度时变曲线—实测与模拟比较

## 4 火焰顶棚射流的平均温度的纵向变化规律

前面推导的公式(13)可用于地铁隧道列车着火后,火灾在隧道内自然燃烧和蔓延的情况(有机械通风的情况另文研究)。该式是比较繁琐的指数函数形式,下面通过实验和模拟数据确定其中的待定系数,并对其进行简化处理,以得到简便实用的计算公式。以燃烧 250 mL 庚烷的数据为例,通过迭代计算可求出不同纵向断面位置的火焰烟流的平均温度,并拟合出其随距离变化的曲线,得到理论预测公式(13)的简化公式(14),如图 6 所示。

$$\bar{T}_f = \bar{T}_c + D_c \cdot \exp\left(-\frac{y}{l}\right) \quad (14)$$

$\bar{T}_c = 253.916, D_c = 234.016, l = 0.75$ , 相关系数为 0.998 75。

图 6 表明:由理论预测公式(13)得到的计算值与数值模拟值在列车长度范围内吻合较好,最小误差为 0.7%,最大误差为 5.04%。A 点是列车端点,烟流离开 A 点沿着坐标轴方向进入隧道后,卷吸冷空气的流量突然增大,使温度快速下降(如 AB 曲线段)。因此,在 A 点附近存在温度变化幅度较大的过渡区,预测误差增大到 6.88%;随着距离的增加,预测误差继续增大,最大可达 16%。可见,火焰烟流的平均温度在环形空间和隧道内都以指数形式衰减,但衰减的程度不同,可以通过分段拟合的方法对理论预测公式进行修正,从而得到式(15)。

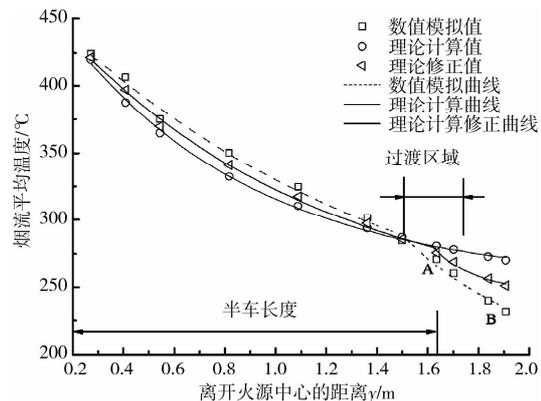


图 6 火焰顶棚射流的平均温度随着纵向距离变化的情况

$$\bar{T}_f = \bar{T}_c + D_c \cdot \exp\left(-\frac{y}{l}\right) \quad (15)$$

当  $0.2725 \text{ m} < y < 1.4988 \text{ m}$  时,  $\bar{T}_c = 227.867, D_c = 250.156, l = 1.0309$ , 相关系数为 0.996 9;

当  $1.4988 \text{ m} < y < 1.9075 \text{ m}$  时,  $\bar{T}_c = 245.835, D_c = 364.181.681, l = 0.175$ , 相关系数为 0.979 9。

## 5 结 论

1) 针对隧道列车中部着火时形成火焰顶棚射流的情况,建立二维单元控制体模型,对夹带火焰的火焰顶棚射流的平均温度进行了理论分析,并推导出其迭代计算公式。

2) 通过1:8缩尺比例的模型实验和数值模拟计算,分析了夹带火焰的烟气顶棚射流平均温度的特性,确定了所推导的迭代计算公式中的待定系数,给出了简便实用的平均温度经验公式。

3) 在隧道列车火灾中,列车上方环形空间内的火焰烟流的平均温度以指数形式衰减;火焰烟流由环形空间进入隧道后,因卷吸的冷空气增多而使温度快速下降,烟流的平均温度以另一指数形式衰减。因此,在列车两端附近存在温度变化幅度较大的过渡区。

### 参考文献:

- [1] ALPERT R L. Turbulent Ceiling-Jet Induced by Large-Scale Fires[J]. *Combustion Science and Technology*, 1975 (11):197-213.
- [2] ALPERT R L. Ceiling-Jet Flows[C]//In SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. Quincy, Mass: National Fire Protection Association, 1995:233-246.
- [3] HITOSHI KURIOKA, YASUSHI OKAB, HIROOMI SATOHA, et al. Fire properties in near field of square fire source with longitudinal ventilation in tunnels[J]. *Fire Safety Journal*, 2003(38): 319-340.
- [4] HU L H, HUO R, PENG W, et al. On the maximum smoke temperature under the ceiling in tunnel fires[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2006 (21): 650-655.
- [5] HU L H, HUO R, WANG H B, et al. Experimental studies on fire-induced buoyant smoke temperature distribution along tunnel ceiling[J]. *Building and Environment*, 2007, 42: 3905-3915.
- [6] YUNUS A ÇENGEL. Heat and mass transfer: A practical approach, third edition[M]. New York, the United States. McGraw-Hill Companies, Inc., 2007:507-512.
- [7] HINKLEY P L, WRAIGHT H G H, THEOBALD C R. The Contribution of flames under ceilings to fire spread in compartments[J]. *Fire Safety Journal*, 1984 (7): 227-242.
- [8] 毛军, 郝艳红, 樊洪明. 地铁隧道列车火灾的火焰顶棚射流温度特性研究[J]. *土木工程学报*, 2010, 43(2): 119-126.  
MAO JUN, XI YAN-HONG, FAN HONG-MING. Analysis on the characteristics of the flame ceiling jet temperature due to train fire in subway tunnels[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2010, 43(2):119-126.
- [9] 郝艳红, 毛军, 樊洪明, 等. 地铁列车着火后在隧道内行驶的安全速度[J]. *华南理工大学学报*, 2010, 38(3):25-30.  
XI YAN-HONG, MAO JUN, FAN HONG-MING, et al. Safety velocity of on-fire train moving in subway tunnel [J]. *Journal of South China University of Technology*, 2010, 38(3): 25-30.
- [10] 钟委. 地铁站火灾烟气流动特性及控制方法研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2007.
- [11] YUNUS A ÇENGEL. Heat and mass transfer: A practical approach, third edition [M]. New York, the United States. McGraw-Hill Companies, Inc., 2007: 731-732.
- [12] 杜咏, 李国强. 大空间建筑火灾中火焰辐射对无保护钢结构升温的影响[J]. *火灾科学*, 2006, 15(4):189-199.  
DU YONG, LI GUO-QIANG. Fire radiation effect on steel member at elevated temperature in large space fire [J]. *Fire Safety Science*, 2006, 15(4):189-199.
- [13] 严治军. 火灾建筑的热传导解析[J]. *重庆建筑大学学报*, 1997, 19(5):107-111.  
YAN ZHI-JUN. An analysis of heat transfer in building under fire[J]. *Journal of Chongqing Jianzhu University*, 1997, 19(5):107-111.
- [14] 刘方, 付祥钊, 廖曙江, 等. 热辐射对中庭火灾烟流的影响[J]. *重庆大学学报:自然科学版*, 2002, 25(1):28-31.  
LIU FANG, FU XIANG-ZHAO, LIAO SHU-JIANG, et al. Thermal radiation effects on smoke-flow in atrium fires [J]. *Journal of Chongqing University: Natural Science Edition*, 2002, 25(1):28-31.
- [15] KUNSCH J P. Critical velocity and range of a fire-gas plume in a ventilated tunnel [J]. *Atmospheric Environment*, 1999, 33:13-24.
- [16] 毛军, 郝艳红, 樊洪明. 隧道内列车着火的火焰顶棚射流温度特性研究[J]. *华南理工大学学报*, 2010, 38(3): 17-23.  
MAO JUN, XI YAN-HONG, FAN HONG-MING. Analysis on the maximum temperature distribution of the flame ceiling jet in tunnel fire[J]. *Journal of South China University of Technology*, 2010, 38(3):17-23.
- [17] 赵耀华, 樊洪明, 李炎锋, 等. 北京地铁火灾烟气控制计算机模拟研究报告[R]. 北京:北京工业大学, 2006.
- [18] 毛军, 郝艳红, 樊洪明. 隧道内火焰顶棚射流最高温度的分布研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2010, 39(3):346-351.  
MAO JUN, XI YAN-HONG, FAN HONG-MING. Analysis on the temperature of the flame ceiling jet generated by different parts of the train fire[J]. *Journal of CUMT Mining Science and Technology*, 2010, 39(3):346-351.