

## 城市公路隧道近火源区质量卷吸速率研究

张轩轩, 牛国庆, 李垣志

(河南理工大学安全科学与工程学院, 河南焦作 454000)

**摘要:** 质量卷吸速率是火灾烟气防控时不可忽视的关键因素. 以全尺寸的城市公路隧道为研究对象, 采用量纲分析和数值模拟的方法, 探究了火源功率、有效顶棚高度、火源横向位置、隧道宽度对烟气质量卷吸速率的影响. 通过对前人所提出的卷吸模型适用性分析和 20 组模拟工况下卷吸速率变化规律的研究, 结果表明: 对于具有不同卷吸机理的大、小火源功率的隧道火灾, 前人提出的 II、III 阶段的卷吸模型具有一定局限性; 采用集气罩法测定了火源近场区质量卷吸速率, 并用离散化方法对阶段 II、III 截面质量流率进行计算, 提高了结果的准确性; 基于量纲分析的方法构建了火源功率、隧道宽度、火源位置、有效顶棚高度等重要因素间的无量纲烟气卷吸模型, 结合数值模拟并对数据拟合得到了 II、III 阶段烟气质量卷吸速率的定量关系式.

**关键词:** 公路隧道; 数值模拟; 量纲分析; 质量卷吸速率

**中图分类号:** X928.7      **文献标识码:** A      doi: 10.3969/j.issn.0253-2778.2019.04.010

**引用格式:** 张轩轩, 牛国庆, 李垣志. 城市公路隧道近火源区质量卷吸速率研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2019, 49(4): 329-342.

ZHANG Xuanxuan, NIU Guoging, LI Yuanzhi. Research on smoke entrainment rate of urban highway tunnel near the fire source area[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2019, 49(4): 329-342.

## Research on smoke entrainment rate of urban highway tunnel near the fire source area

ZHANG Xuanxuan, NIU Guoging, LI Yuanzhi

(School of Safety Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

**Abstract:** The mass entrainment rate is a key factor that can not be ignored when preventing and controlling flue gas. The full-scale urban highway tunnel was taken as the research object, and dimensionless analysis and numerical simulation methods were used to investigate the influence of fire power, effective ceiling height, fire source lateral position and tunnel width on the mass entrainment rate of flue gas. Through the analysis of the suitability of the rolling suction model proposed by previous researchers and the variation of the entrainment rate under the 20 simulation conditions, the results show that for the large and small power sources with different entrainment mechanisms, the entrainment models proposed by predecessors at the stage II and III have certain limitations. The mass entrainment rate in the near-field area of the fire source was measured by the hood method. And the mass flow rate of the stage II and III sections was calculated by the discretization method with the accuracy of the results being improved. Based

收稿日期: 2018-04-11; 修回日期: 2018-07-30

基金项目: 国家自然科学基金(51774116)资助.

作者简介: 张轩轩, 女, 1990 年生, 硕士生. 研究方向: 火灾防治理论与技术. E-mail: 1151524372@qq.com

通讯作者: 牛国庆, 博士/教授. E-mail: 343697125@qq.com

on the dimensional analysis method, the dimensionless smoke entrainment model was constructed, which is associated with the key factors, such as the fire power, the tunnel width, the fire source position, and the effective ceiling height. And the quantitative relation formulas of gas mass entrainment rate in stage II and III were obtained by numerical simulation and data fitting.

**Key words:** highway tunnel; numerical simulation; dimension analysis; mass entrainment rate

## 0 引言

城市公路隧道的快速发展在有效缓解交通压力的同时,也给社会带来了负面影响.由于公路隧道特殊的狭长结构,一旦发生火灾,将给人们造成无法估量的人员伤亡和财产损失.统计结果表明<sup>[1]</sup>,火灾中超过 85% 的人员伤亡都是由烟气造成的.因此,研究烟气生成和蔓延过程中的卷吸机理和模型对人员疏散、现场救援和防排烟系统的设计具有重要意义.

国内外学者对于隧道火灾烟气质量卷吸的研究取得了显著成果.在火羽流对空气的卷吸方面,目前最为常用的计算羽流质量卷吸速率的经典模型有 Zukoski 模型<sup>[2-4]</sup>、McCaffrey 模型<sup>[5-6]</sup>、Heskestad 模型<sup>[7]</sup>和 Hinkley 模型<sup>[8]</sup>等.这些经典羽流模型均有其特定的适用条件,不宜直接用来计算隧道中烟气的质量卷吸速率.针对烟气水平蔓延阶段对空气的卷吸,王浩波等<sup>[9]</sup>通过小尺寸实验对烟气蔓延的第 II、III 阶段(径向蔓延阶段和过渡阶段)烟气卷吸速率进行了探究,并提出了相关预测模型,但其所采用的火源功率较小.Kunsch<sup>[10-11]</sup>提出了烟气在一维蔓延阶段的卷吸速率计算公式,但公式的正确性缺乏实验的验证.纪杰、王浩波等<sup>[9,12-13]</sup>通过小尺寸试验得出了各阶段的烟气层质量卷吸模型,但其所选的火源功率较小且火灾场景较为简单,其结果是否能够推广仍有待验证.虽然前人通过实验研究提出了各阶段烟气卷吸速率模型,但只是针对火源位于隧道中部且火源功率较小的火灾情况,能否适用于大火源功率以及火源横向位置发生变化时的情况仍有待进一步验证与研究.

因此,本文采用理论分析和数值模拟的方法对现有模型进行验证和适用性分析,并建立了适用于隧道火灾烟气蔓延过程中 II 和 III 阶段的烟气卷吸模型,以期为隧道火灾烟气防控及人员救援提供理论支持.

## 1 卷吸速率模型适用性分析

### 1.1 模型建立及测点布置

文献[12]通过小尺寸实验提出了地铁火灾烟气蔓延过程中各阶段的烟气卷吸模型.其中,羽流上升阶段采用 Zukoski 模型,如式(1)所示.

$$\dot{m}_1 = 0.21 \left( \frac{\rho_0^2 g}{C_p T_0} \right)^{1/3} Q^{1/3} z^{5/3} \quad (1)$$

式中,  $T_0/K$  为环境温度;  $\rho_0/(kg \cdot m^{-3})$  为空气密度;  $C_p/(J \cdot g^{-1} \cdot K^{-1})$  为空气比定压热容;  $g$  为重力加速度  $9.81m \cdot s^{-2}$ ;  $Q/(kW)$  为火源功率;  $z/m$  为烟气羽流离地面的高度.

阶段 II、III 的质量卷吸模型<sup>[12]</sup>如下所示:

$$\dot{m}'_2 = 0.138 \dot{Q}^{1/3} \dot{Z}^{5/3} \quad (2)$$

$$\dot{m}'_3 = 0.028 \dot{Q}^{1/3} \dot{Z}^{5/3} \quad (3)$$

式中,  $\dot{Q}$  为无量纲火源功率;  $\dot{Z}$  为无量纲烟气层高度.

根据相似原理和模型设计需要,对文献中的小尺寸模型按照 8:1 比例进行放大,来验证上述质量卷吸速率模型对全尺寸模型的适用性<sup>[14]</sup>.

全尺寸模型与小尺寸模型初始边界条件相同,分别在距火源中心位置 6m、16m、40m 位置处布置速度切片以获取丰富的烟气流动速度数据,距顶棚 0.05m 处布置两串水平热电偶,每串 63 个测点,测点纵向之间间隔 0.8m,横向间隔 5.8m,燃料为甲醇,如图 1 所示.

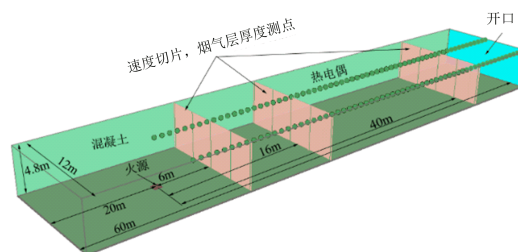


图 1 8:1 全尺寸模型图

Fig. 1 8:1 full size model diagram

为了进一步探究该质量卷吸模型在大火源功率

上的适用性,采用文献[15]中所建立的全尺寸模型并增设大火源功率进行计算,火源功率为 0.8 MW、2 MW、8 MW、10 MW、12 MW. 所有测点采用原始布置方式,并根据文献[15]近火源区长度的计算结果,在相应的位置布置烟气温度、速度和密度切片,并在每个横截面均匀布置 5 个烟气层厚度测点. 图 2 为火源功率为 12 MW 时的测点布置图.

本文运用 FDS(fire dynamics simulator)数值模拟软件. 网格划分方法与结果与文献[15]中的相同. 工况模拟条件及参数如表 1 所示.

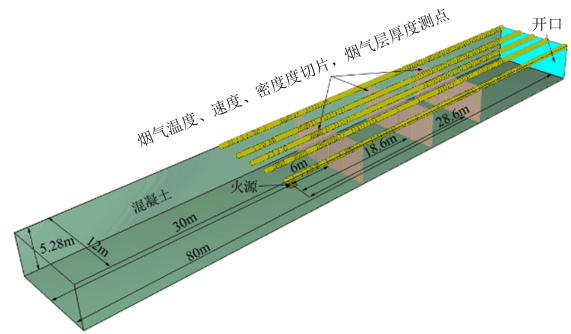


图 2  $Q=12\text{ MW}$  的全尺寸模型  
Fig. 2 Full size model for  $Q=12\text{ MW}$

表 1 全尺寸模型工况条件及参数

Tab. 1 Working conditions and parameters of the full size model

工况	$Q/\text{kW}$	隧道尺寸/m	油盆尺寸/m	$b/\text{m}$	计算截面位置/m
1	3.57	$7.5 \times 1.5 \times 0.6$	$0.1 \times 0.1$	2.5	[0.75; 2; 5]
2	646	$60 \times 12 \times 4.8$	$0.8 \times 0.8$	12	[6; 16; 40]
3	800	$80 \times 12 \times 5.28$	$1.0 \times 1.0$	30	[6; 11; 21]
4	2000	$80 \times 12 \times 5.28$	$1.0 \times 1.0$	30	[6; 11; 21]
5	8000	$80 \times 12 \times 5.28$	$1.0 \times 1.0$	30	[6; 15; 25]
6	10000	$80 \times 12 \times 5.28$	$1.0 \times 1.0$	30	[6; 16.5; 26.5]
7	12000	$80 \times 12 \times 5.28$	$1.0 \times 1.0$	30	[6; 18.6; 28.6]

[注]  $b$  为火源距隧道端部距离. 工况 1~2 的温度为 296 K; 工况 3~7 的温度为 293 K.

### 1.2 计算结果与分析

为了验证上述模型对大火源功率隧道火灾的适用性,采用的计算截面质量流率和卷吸速率的方法同文献[12]保持一致.

根据文献[12]中的方法计算出各阶段的质量卷吸速率,并整理成无量纲形式,将各阶段的质量流率和卷吸速率分别除以该条件下的  $\dot{m}'_1$  和  $\dot{m}'_1$ ,同时保证纵坐标范围与间隔一致,以有利于数据间的对比. 模拟过程中没有对羽流阶段质量流率进行计算,其数据仍采用 Zukoski 模型的计算值. 部分绘制结果图如图 3 和图 4 所示.

从图 3(a)可以看出,当  $Q=646\text{ kW}$  时, FDS 模拟值与模型计算值吻合较好,截面质量流率的最大相对误差在 6% 左右. 从图 3(b)可以看出,模型计算值与 FDS 模拟值相差不大,最大质量流率误差在 10% 以内,卷吸速率曲线吻合度较高.  $\dot{m}'_4$  的模型计算值与 FDS 模拟值差异较大:一方面是由卷吸系数取值不同造成的;另一方面该值的准确性受两截面上 ( $x=40\text{m}, 16\text{m}$ ) 的平均速度差值的影响较大,由

于预测模型是在特定的实验条件下提出的,因此对截面上烟气速度的测定存在较大的不确定性. 因此,针对小火源功率的全尺寸模型,文献[12]提出的质量卷吸模型具有较高的准确性和较强的适用性.

图 4 为大火源功率的相对质量流率及卷吸率对比图. 从图 4 可以看出,火源功率越大,截面上的质量流率越大,模型计算值与 FDS 模拟值的差异就越大. 而在质量卷吸速率方面,在阶段 II 中,两种火源功率的模型计算值均比模拟值要小. 在阶段 III 中模拟值与计算值的差异随火源功率的增大而增大,尤其是当火源功率增大至 12000 kW 时,阶段 III 的模拟值与计算值具有明显的不同. 造成上述差异的原因归结于以下几个方面:

(I) 阶段 I 的卷吸机理不同. 随着火源功率的增加,火焰开始撞击顶棚,以湍流形式存在. 研究表明湍流的脉动量对空气的卷吸量有很大的影响<sup>[16]</sup>,而且火焰对空气的卷吸起主导作用. 而对于小功率火源,火焰未触及顶棚时,在阶段 I 过程中,火(烟)羽流对空气的卷吸量是火焰与浮力羽流共同作用的结果.

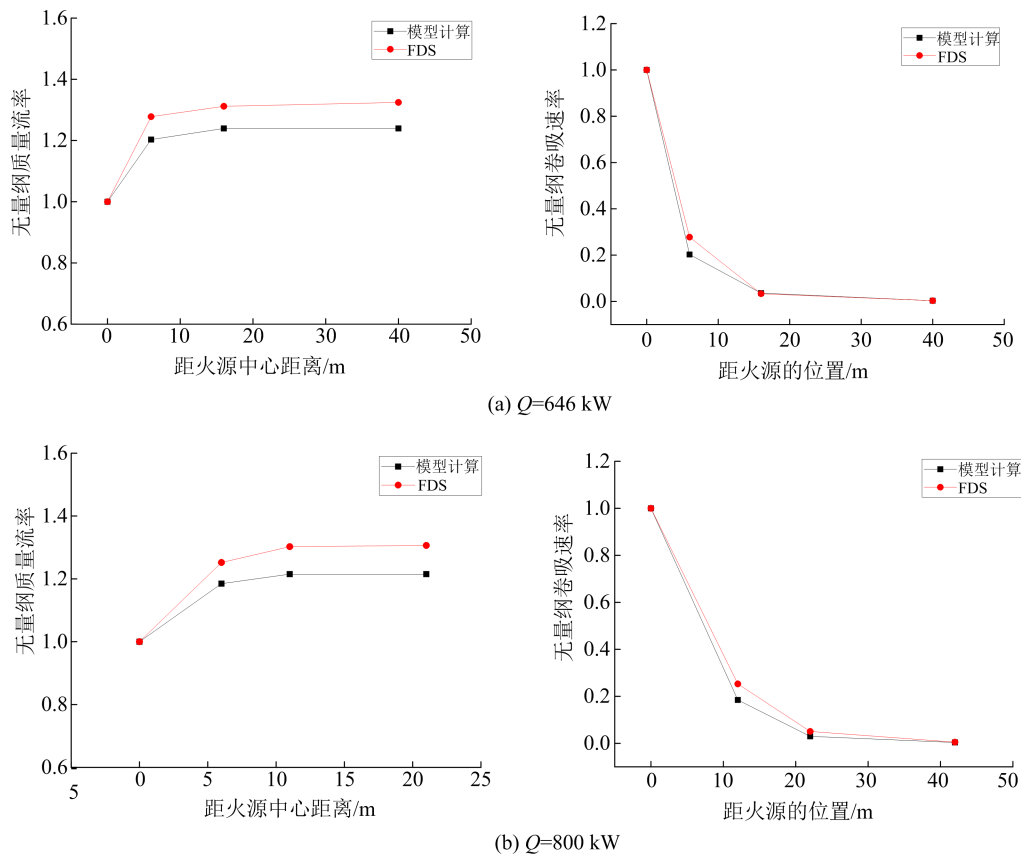


图 3 小火源功率下无量纲质量流率及卷吸率对比图

Fig. 3 Contrast diagram of dimensionless mass flow rate and entrainment rate under small fire power

(II)阶段II的卷吸机理不同. 火焰撞击顶棚后, 受顶棚的阻挡, 在二维径向扩散阶段既有火焰射流又有烟气射流, 烟气受火焰的扰动影响, 涡旋结构更加明显, 加速了烟气与空气的掺混. 同时火源功率的增加使水平火焰热驱动力也不断增强, 加快了烟流的径向扩散速度, 热烟气层对冷空气层的剪切作用增强.

(III)与空气的接触面积有关. 根据 MaCffrey 质量流率模型可以计算出连续火焰区、间歇区和烟气羽流区对空气的卷吸速率, 可以推断, 烟气羽流区的卷吸速率>间歇区>连续火焰区. 这是由于羽流半径与其对空气的卷吸量有密切的关系, 而火源功率的变化将直接导致火(烟)羽流直径发生变化, 正如 Quintiere 等<sup>[17]</sup>认为火羽流半径增长速率与空气卷吸速率成正比关系. 对于一般池火, 火羽流半径在火焰区和羽流区都随高度增加而线性增加, 但在火焰区内的增加速率比在羽流区内要慢很多. 因此, 对于大火源功率, 影响其卷吸速率的主要因素是火焰与空气的接触面积.

图 5 给出了  $Q = 2000\text{kW}$  时火(烟)羽流速度矢量图. 从图中可以看出:  $t = 2\text{s}$  时, 燃烧产生的热驱

动力对周围静止空气产生剧烈的扰动, 使火羽流周围产生一对反方向涡流;  $t = 2.9\text{s}$  时开始形成烟羽流, 并不断卷吸周围空气, 羽流半径也不断增加, 对周围空气的扰动范围也随之扩大;  $t = 4.1\text{s}$  时烟羽流到达顶棚, 开始形成沿径向蔓延的顶棚射流. 从  $t = 4.1, 5.2, 17\text{s}$  时的速度矢量图上可以看出, 烟羽流附近产生了大量的涡旋结构, 表明与空气的掺混作用强烈, 卷吸速率增加; 当火源功率较小时, 火焰基本处于稳态, 在火羽流区对空气的扰动作用较小, 不会产生较大的速度梯度, 即不会产生较大的涡旋结构, 质量流率较小; 而当火焰发展至烟羽流区时, 进入湍流状态, 则会产生较大的涡旋结构. 从羽流半径上来看, 烟羽流区要比火焰区的半径大, 与空气的接触面积就大, 表明烟羽流区对空气的卷吸作用要大于火焰区.

因此, 在阶段 I 所采用的 Zukoski 模型和前人提出的 II 和 III 阶段模型只适用于燃烧相对较弱的火灾场景, 而针对隧道这种大火源功率的情况已不适用, 需要提出一个适用于大火源功率的卷吸速率模型. 这一结论与文献[18]的实验结果相吻合.



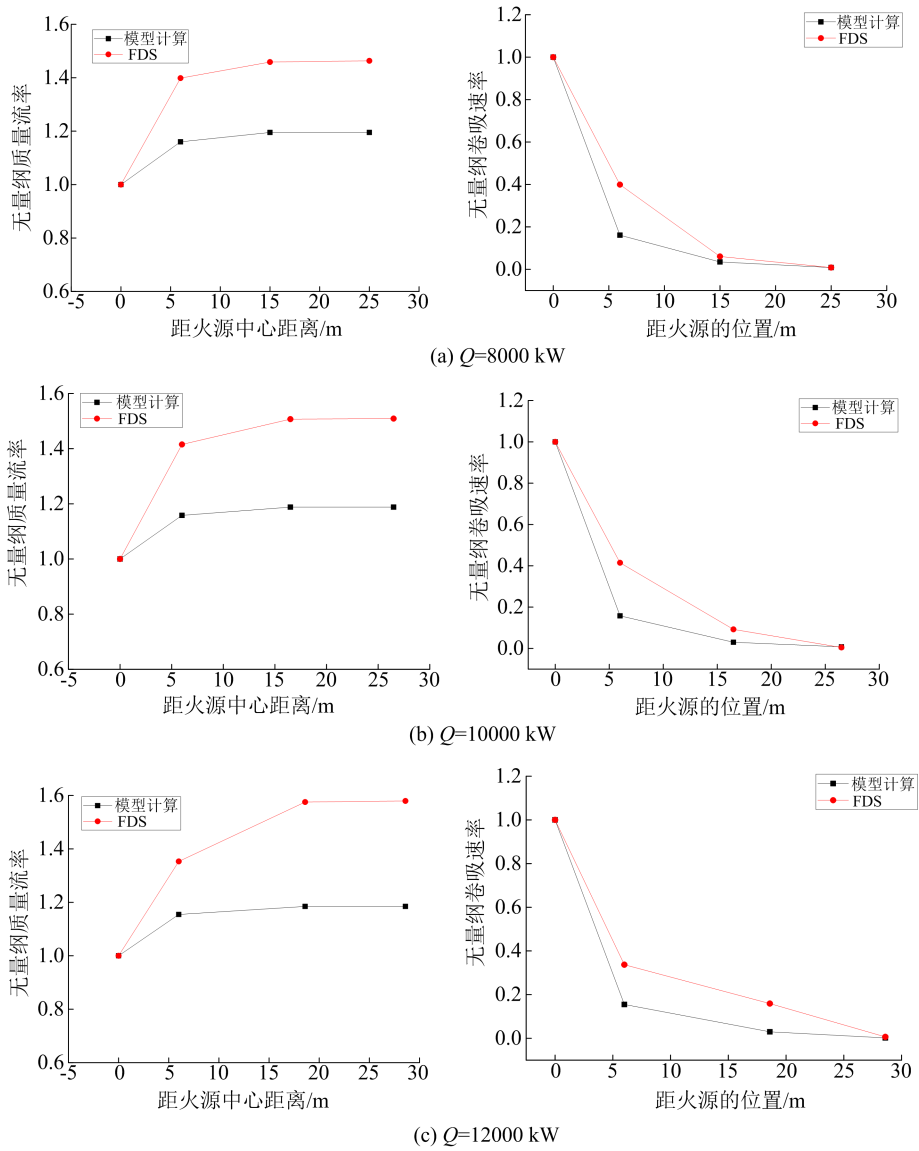


图 4 大火源功率无量纲质量流率及卷吸率对比图

Fig. 4 Contrast diagram of dimensionless mass flow rate and entrainment rate under large fire power

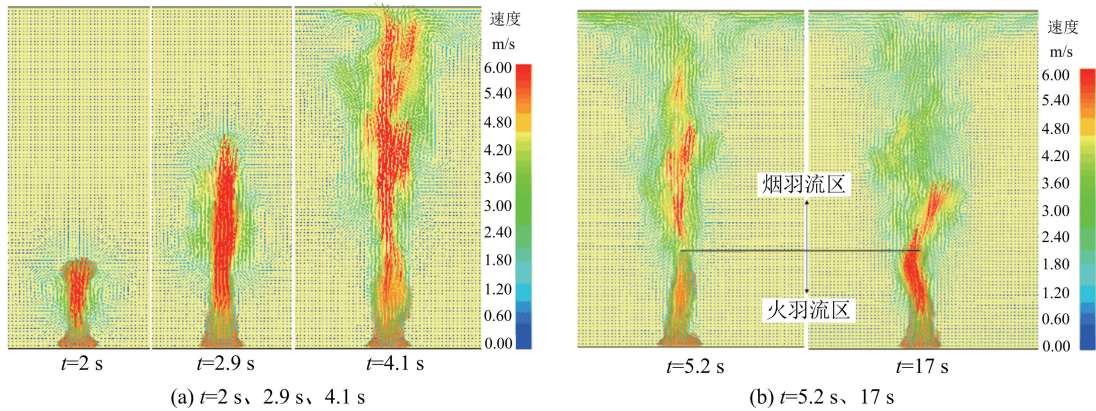


图 5  $Q=2000 \text{ kW}$  时火羽流速度矢量图

Fig. 5 Vector diagram of plume velocity at  $Q=2000 \text{ kW}$

## 2 烟气卷吸量的影响因素

### 2.1 火源功率

从模型适用性分析中可以看出,不同火源功率下烟气的卷吸机理不同,对于大火源功率和小火源功率应选用不同的卷吸速率计算模型.此外,隧道宽度将直接影响烟气层与冷空气层的接触面积,进而影响空气的卷吸量.

### 2.2 火源横向位置

(I)对烟气层高度的影响

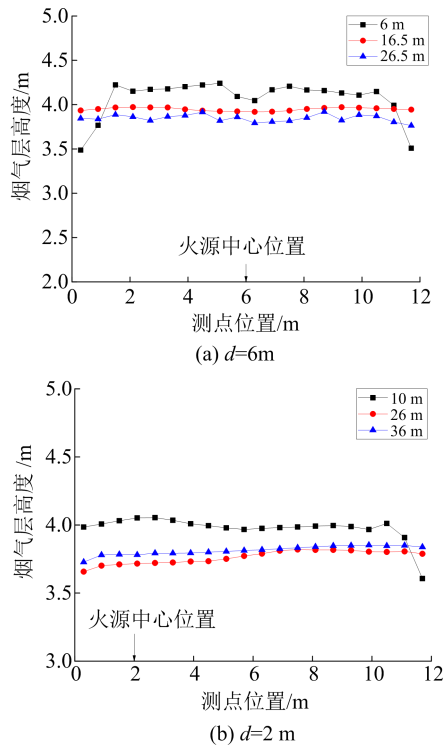


图 6 烟气层高度分布曲线

Fig. 6 Height distribution curves of flue gas layer

图 6 给出了火源功率为 10 MW 时,火源中心距侧壁 6 m、2 m 时的烟气层高度分布曲线.当火源位置与侧壁距离逐渐减小时,阶段 II 中的反浮力壁面射流呈不对称分布,阶段 III、IV 中的烟气层高度略有倾斜.由于火羽流与侧壁发生接触,受侧壁的阻挡,火羽流无法卷吸近侧壁空气,因此,图 6(b)中近侧壁处并未发现壁面射流.由于一维蔓延阶段对空气的卷吸速率较小,过渡区结束位置与距该位置 10 m 处(位于一维蔓延区中)的烟气层高度相差较小.即烟气层高度的变化决定横截面上烟气的厚度,进而影响卷吸量.

(II)对烟气特征参数的影响

当火源位于隧道中部时,近火源区截面上不同

横向位置上温度和速度分布存在一定的差异.当火源位置发生变化时,这种差异将更加明显.图 7 为  $Q=10\text{ MW}$ ,火源贴壁时,距火源中心 11.5 m 处的温度和速度分布切片.

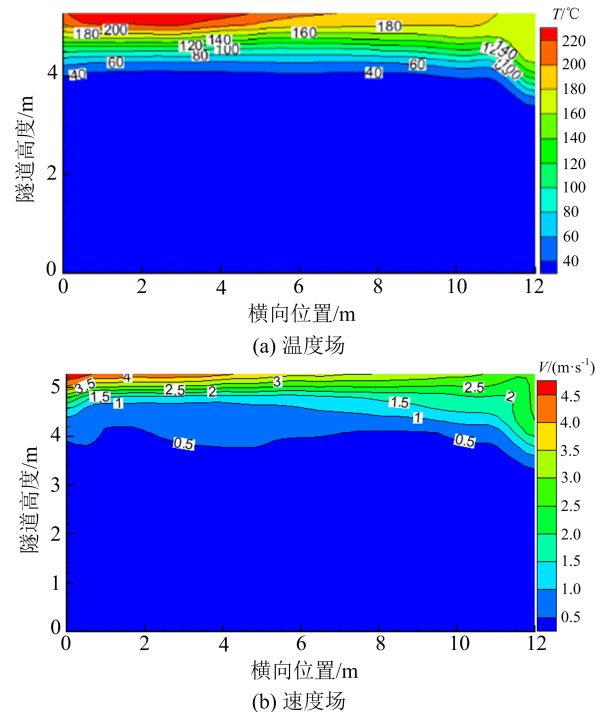


图 7 火源贴壁时,横截面上温度场和速度场分布

Fig. 7 The distribution of temperature and velocity field on the cross section when the fire source is attached to the wall

从图 7 可以看出,受火源位置的影响,温度及速度场呈不对称分布,同时受水平扩展火焰的影响,其附近的烟气产生局部高温区和高速区,而远侧壁烟流特性分布较为平稳.因此,当火源位置改变时,横向方向上烟流特性分布极为不均匀,对烟气卷吸量有很大影响,也为计算质量流率带来了较大的困难.

### 2.3 有效顶棚高度

如图 8 所示,当有效顶棚高度较小时,火焰撞击顶棚并产生水平扩展火焰,火焰附近产生较大的速度场,促进了烟气层对空气的卷吸作用,同时水平火焰蔓延过程中伴有化学应对空气的消耗,使卷吸速率大大增加.若顶棚高度足够小,水平火焰可延伸至过渡区,对过渡区的卷吸作用也会产生较大的影响.

## 3 近场区火羽流质量流率

### 3.1 测定方法

根据文献[12]中对阶段 II、III 和 IV 烟气层卷吸流率的计算方法,阶段 I 中羽流质量流率测算的准确性将直接影响阶段 II 空气卷吸流率的计算.羽流

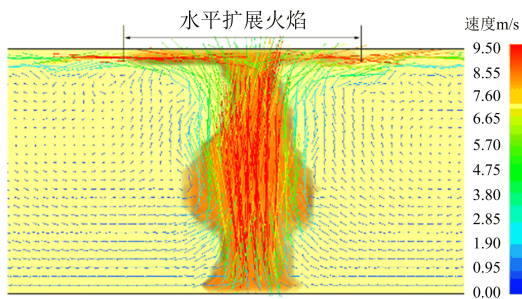


图 8 水平扩展火焰图

Fig. 8 Horizontally extended flame

质量流率的测量方法很多,有直接测量法、集气罩法、速度温度的点式测量法、速度矢量的 LDV/PIV 全场测量法及燃烧产物取样分析法<sup>[19]</sup>,而这些模型均有其特定的适用条件.根据本例的特点,选择燃烧物取样分析法测量径向扩散阶段的质量流率,该方法最早由 Cetegen<sup>[3]</sup>提出.具体做法是,在火源正上方安置一个直径大于火焰直径的小方形集烟罩,由铁质材料制成,  $Q = 6 \text{ MW}$  时火源特征直径为  $3 \text{ m}$ ,故集烟罩尺寸为  $2.5 \text{ m}$  见方,热烟气可以从底部溢出,在小集烟罩外部有一个大集烟罩  $12 \text{ m} \times 12 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ ,通过排烟装置可以将溢出的烟气排出,防止再次进入小集烟罩内,如图 9 所示,采用甲醇作为燃料.

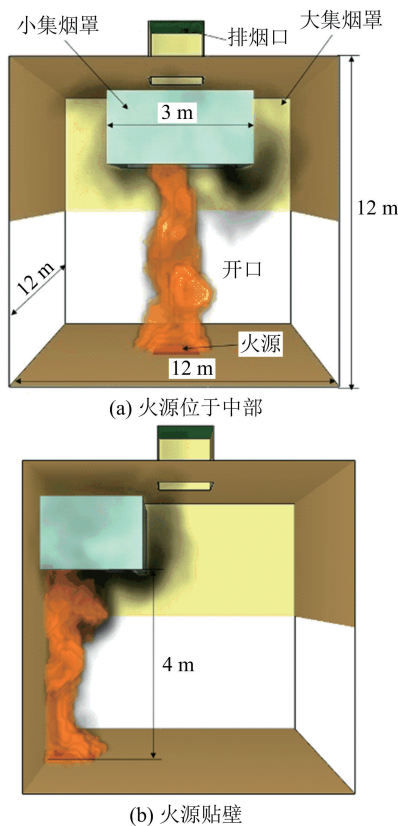
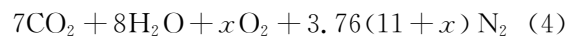
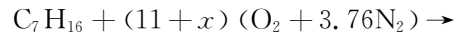


图 9 近场羽流空气卷吸量测定模型

Fig. 9 Measurement model of near-field plume air entrainment volume

通过对小集烟罩内的烟气进行采样分析,从而得到燃空比,再根据燃料消耗速率,可以得到空气卷吸速率.正庚烷与空气燃烧方程见式(4),由于在 FDS 软件中正庚烷的不完全燃烧产物含量极低,小集气罩中始终有大量的空气存在,并且小集气罩表面为钢铁材质,罩内温度较高,不完全燃烧产物极易被反应掉,因此,我们可以近似认为反应物中的 C 完全转化为  $\text{CO}_2$ , H 完全转化为  $\text{H}_2\text{O}$ .



根据燃料的燃烧速率计算卷吸进的空气量,如式(5):

$$\dot{m}_e = \frac{(11 + x)(Mr(\text{O}_2) + 3.76Mr(\text{N}_2))}{Mr(\text{C}_7\text{H}_{16})} \dot{m}_f = 1.3728(11 + x)\dot{m}_f \quad (5)$$

式中,  $\dot{m}_e / (\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$  为空气卷吸量;  $\dot{m}_f / (\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$  为燃料消耗速率.

### 3.2 截面质量流率的计算

通过上述分析可知,隧道截面上的烟气特征参数分布极不均衡.为了更为准确地计算各截面上的热烟气层的质量流率,我们在不同截面上布置速度和密度切片以获得每个节点上烟流的速度和密度信息,并对烟流特征参数离散化,在截面横向方向上均匀布置了 54 个烟气层高度探测装置测点,测点间隔  $\Delta x = 0.22 \text{ m}$ ,如图 10 所示.

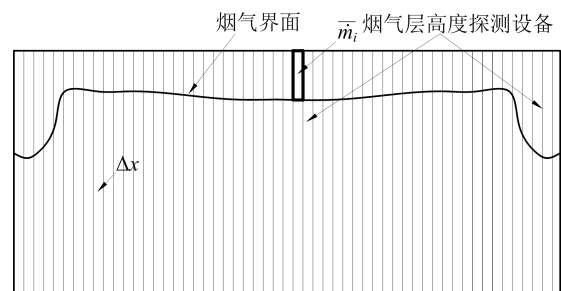


图 10 烟气层高度测点布置图

Fig. 10 The layout of smoke height measuring points

由于数据计算量较大,采用 FDS 自带的 fds2ascii 程序对切片数据进行提取,后期采用 Matlab 编程对数据进行整理并计算.截面质量流率计算步骤为:

(I) 根据温度测点随时间的变化情况,选取烟流温度较为稳定的时间段,运用 fds2ascii 程序对该时间段内的速度和密度切片数据进行平均,并提取;

(II) 将提取后的数据导入 Matlab,将速度场与

密度场做积,得到单位时间单位面积的质量流率场  $\dot{m}_A/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1})$ ,

$$\dot{m}_A = \rho_s u_s \quad (6)$$

(Ⅲ)在烟气层厚度范围内计算质量流率的平均值  $\bar{m}_i, i=1,2,3,\dots,m, m=53$  为总间隔数:

$$\bar{m}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \dot{m}_A^j \quad (7)$$

式中,  $n$  为烟气层厚度范围内包含的节点数目.

(Ⅳ)计算每个间隔上的质量流率,最后将这些间隔相加,即可得到该截面上的总质量流率  $\dot{m}$ ,

$$\dot{m} = \sum_{i=1}^m \bar{m}_i \times h_s \times \Delta x \quad (8)$$

## 4 量纲分析与工况设计

### 4.1 量纲分析

根据上述分析可以得出,烟气卷吸量受火源功率  $Q$ 、有效顶棚高度  $H_{ef}$ 、火源横向位置(中心距近侧壁距离)  $d$  的影响,此外还与水平蔓延长度  $l$  (两个计算横截面之间的距离)、烟气羽流离地面的高度  $z$ 、隧道宽度  $\omega$ 、环境温度  $T_a$ 、空气密度  $\rho_a$ 、重力加速度  $g$ 、空气定压比热容  $C_p$  等因素有关,见式(9).

$$f(\dot{m}_i, Q, H_{ef}, d, l, z, \omega, T_a, \rho_a, g, C_p) = 0 \quad (9)$$

$$\pi_1 = \dot{m}_i H_{ef}^{a_1} T_a^{b_1} \rho_a^{c_1} g^{d_1},$$

$$\pi_2 = Q H_{ef}^{a_2} T_a^{b_2} \rho_a^{c_2} g^{d_2},$$

$$\pi_3 = C_p H_{ef}^{a_3} T_a^{b_3} \rho_a^{c_3} g^{d_3},$$

$$\pi_4 = d H_{ef}^{a_4} T_a^{b_4} \rho_a^{c_4} g^{d_4},$$

$$\pi_5 = l H_{ef}^{a_5} T_a^{b_5} \rho_a^{c_5} g^{d_5},$$

$$\pi_6 = \omega H_{ef}^{a_6} T_a^{b_6} \rho_a^{c_6} g^{d_6},$$

$$\pi_7 = z H_{ef}^{a_7} T_a^{b_7} \rho_a^{c_7} g^{d_7}.$$

使得等式右边的基本量纲因次为 0,最终计算结果为

$$\pi_1 = \dot{m}_i H_{ef}^{-5/2} T_a^0 \rho_a^{-1} g^{-1/2},$$

$$\pi_2 = Q H_{ef}^{-7/2} T_a^0 \rho_a^{-1} g^{-3/2},$$

$$\pi_3 = \frac{C_p T_a}{H_{ef} g}, \pi_4 = \frac{d}{H_{ef}}, \pi_5 = \frac{l}{H_{ef}},$$

$$\pi_6 = \frac{\omega}{H_{ef}}, \pi_7 = \frac{z}{H_{ef}},$$

$$f(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6) = 0 \quad (10)$$

将  $\pi_3$  带入  $\pi_2$  得无量纲火源功率  $Q^*$ ,  $\pi_5$  乘以  $\pi_6$  可以得到烟气层与冷空气层的接触面积  $A^*$ ,  $\pi_4$  除以  $\pi_6$  可以得到无量纲横向火源位置. 可整理为

$$f\left(\frac{\dot{m}_i}{H_{ef}^{5/2} \rho_a g^{1/2}}, \frac{Q}{C_p T_a \rho_a g^{1/2} H_{ef}^{5/2}}, \frac{l \omega}{H_{ef}^2}, \frac{d}{\omega}, \frac{z}{H_{ef}}\right) = 0 \quad (11)$$

$$f(\dot{m}_i^*, Q^*, A^*, d^*, Z^*) = 0 \quad (12)$$

$$\dot{m}_i^* = f(Q^*, A^*, d^*, Z^*) \quad (13)$$

可以看出,无量纲质量卷吸速率与无量纲火源功率  $Q^*$ 、无量纲烟气层与空气层接触面积  $A^*$ 、无量纲火源横向位置  $d^*$ 、无量纲火羽流卷吸高度  $Z^*$  有关.

### 4.2 模拟工况设计

根据量纲分析的结果,运用控制变量法,分别改变火源功率  $Q$ 、隧道宽度  $\omega$ 、火源位置  $d$ 、有效顶棚高度  $H_{ef}$ ,使得上述 4 个无量纲数组发生变化. 具体模拟方案如表 2、表 3 所示.

表 2 模拟工况参数及径向扩散区无量纲数组计算

Tab. 2 Simulated working condition parameters and calculation of dimensionless array in radial diffusion zone

组别	编号	火源功率 /MW	$H_{ef}/\text{m}$	$A_2/\text{m}^2$	$\omega/\text{m}$	$l/\text{m}$	$d/\text{m}$	$h_s/\text{m}$	$Q^*$	$Z^*$	$A_2^*$	$d^*$
G1	1	6	5.28	72.00	12	12.50	6.00	1.16	0.09	0.78	2.58	0.50
	2	8	5.28	72.00	12	15.00	6.00	1.24	0.11	0.77	2.58	0.50
	3	10	5.28	72.00	12	16.50	6.00	1.25	0.14	0.76	2.58	0.50
	4	12	5.28	72.00	12	18.50	6.00	1.27	0.17	0.76	2.58	0.50
	5	14	5.28	72.00	12	19.50	6.00	1.31	0.20	0.75	2.58	0.50



续表 2

组别	编号	火源功率 /MW	$H_{ef}/m$	$A_2/m^2$	$w/m$	$l/m$	$d/m$	$h_s/m$	$Q^*$	$Z^*$	$A_2^*$	$d^*$
G2	6	10	4.78	72.00	12	19.50	6.00	1.20	0.18	0.75	3.15	0.50
	7	10	4.28	72.00	12	21.00	6.00	1.09	0.24	0.75	3.93	0.50
	8	10	3.78	72.00	12	23.50	6.00	1.07	0.33	0.72	5.04	0.50
	9	10	3.28	72.00	12	25.00	6.00	0.99	0.47	0.70	6.69	0.50
	10	10	2.78	72.00	12	27.00	6.00	0.96	0.70	0.65	9.32	0.50
G3	11	10	5.28	96.00	12	19.50	4.00	1.35	0.14	0.74	3.44	0.33
	12	10	5.28	108.00	12	21.50	3.00	1.31	0.14	0.75	3.87	0.25
	13	10	5.28	120.00	12	26.00	2.00	1.26	0.14	0.76	4.30	0.17
	14	10	5.28	132.00	12	27.00	1.00	1.24	0.14	0.77	4.73	0.08
	15	10	5.28	138.00	12	28.50	0.50	1.14	0.14	0.78	4.95	0.04
G4	16	10	5.28	50.00	10	16.50	5.00	1.36	0.14	0.74	1.79	0.50
	17	10	5.28	72.00	12	16.50	6.00	1.25	0.14	0.76	2.58	0.50
	18	10	5.28	84.50	13	16.50	6.50	1.17	0.14	0.78	3.03	0.50
	19	10	5.28	98.00	14	16.50	7.00	1.08	0.14	0.80	3.52	0.50
	20	10	5.28	112.50	15	16.50	7.50	0.98	0.14	0.81	4.04	0.50

表 3 模拟工况参数及过渡区无量纲数组计算

Tab. 3 Simulated working condition parameters and calculation of dimensionless array in transition region

组别	编号	火源功率 /MW	$H_{ef}/m$	$A_3/m^2$	$w/m$	$l/m$	$d/m$	$h_s/m$	$Q^*$	$Z^*$	$A_3^*$	$d^*$
G1	1	6	5.28	78.00	12	12.50	6	1.29	0.09	0.76	2.80	0.50
	2	8	5.28	108.00	12	15.00	6	1.32	0.11	0.75	3.87	0.50
	3	10	5.28	126.00	12	16.50	6	1.33	0.14	0.75	4.52	0.50
	4	12	5.28	150.00	12	18.50	6	1.45	0.17	0.73	5.38	0.50
	5	14	5.28	162.00	12	19.50	6	1.58	0.20	0.70	5.81	0.50
G2	6	10	4.78	162.00	12	19.50	6	1.42	0.18	0.70	7.09	0.50
	7	10	4.28	180.00	12	21.00	6	1.38	0.24	0.68	9.83	0.50
	8	10	3.78	210.00	12	23.50	6	1.36	0.33	0.64	14.70	0.50
	9	10	3.28	228.00	12	25.00	6	1.27	0.47	0.61	21.19	0.50
	10	10	2.78	252.00	12	27.00	6	1.24	0.70	0.55	32.61	0.50
G3	11	10	5.28	138.00	12	19.50	4	1.49	0.14	0.72	4.95	0.33
	12	10	5.28	150.00	12	21.50	3	1.40	0.14	0.73	5.38	0.25
	13	10	5.28	192.00	12	26.00	2	1.40	0.14	0.73	6.89	0.17
	14	10	5.28	192.00	12	27.00	1	1.36	0.14	0.74	6.89	0.08
	15	10	5.28	204.00	12	28.50	0.5	1.31	0.14	0.75	7.32	0.04

续表 3

组别	编号	火源功率 /MW	$H_{ef}/m$	$A_2/m^2$	$\omega/m$	$l/m$	$d/m$	$h_s/m$	$Q^*$	$Z^*$	$A_3^*$	$d^*$
	16	10	5.28	115.00	10	16.50	5	1.36	0.14	0.74	4.13	0.50
	17	10	5.28	126.00	12	16.50	6	1.33	0.14	0.75	4.52	0.50
G4	18	10	5.28	130.00	13	16.50	6.5	1.31	0.14	0.75	4.66	0.50
	19	10	5.28	133.00	14	16.50	7	1.29	0.14	0.76	4.77	0.50
	20	10	5.28	135.00	15	16.50	7.5	1.26	0.14	0.76	4.84	0.50

表中将每 5 个模拟工况分为 1 组, 各组分别用 G1~G4 表示; 其中 G1 为改变火源功率  $Q$ ; G2 为改变有效顶棚高度  $H_{ef}$ ; G3 为改变火源横向位置  $d$ ; G4 改变隧道宽度  $\omega$ 。

### 5 结果计算与分析

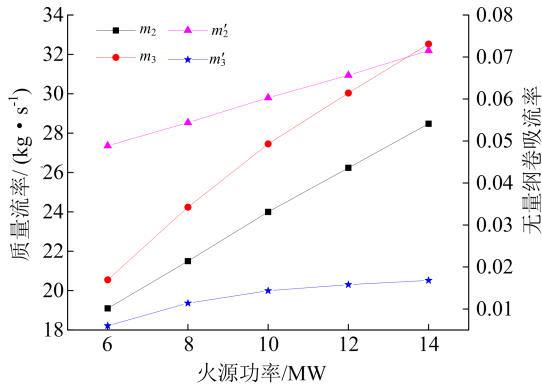


图 11 火源功率对烟气质量流率及卷吸速率的影响  
Fig. 11 Effect of fire power on smoke mass flow rate and entrainment rate

#### 5.1 火源功率对质量卷吸速率的影响

由图 11 可以看出, 随着火源功率的增加,  $\dot{m}_2$  和  $\dot{m}_3$  上的质量流率也随之增加, 这是因为火源功率的增加增大了火羽流的热驱动力以及火焰的脉动强度, 在阶段 I 中大量空气被卷入, 进而直接导致  $\dot{m}_2$  和  $\dot{m}_3$  截面上的质量流率增加. 各阶段的卷吸速率与质量流率有着同样的上升趋势, 这是由于水平卷吸速率主要与界面的接触面积、剪切速度和烟流的湍流强度有关, 随着火源功率的增加, 热烟气的水平移动速度逐渐增大, 同时根据文献[14]的分析, 火源功率的增加将直接导致近火源区长度的增加, 由于火源位于隧道中部, 径向扩散结束位置不发生变化, 最终导致过渡区范围变大, 因此, 过渡区接触面积的增加导致卷吸速率的增加; 再者, 较大的火源功率产生较大尺度的涡旋结构, 烟流的速度梯度越大,

湍流强度越强, 进一步增强了对空气的卷吸作用.

图 12 给出了不同火源功率下, 纵向中心线上烟气速度的分布曲线. 可以看出, 随着火源功率的增大, 纵向蔓延速度也随之增大, 火源正上方火焰流速逐渐增大, 达到最大值时开始迅速降低, 烟流动能突然降低, 在径向扩散区内产生了较大的速度梯度, 卷吸大量的空气, 质量卷吸速率迅速增大, 即发生了水跃现象. 通过粗略计算,  $Q = 10 \text{ MW}$  时, 过渡区内最大速度梯度约为  $0.13 \text{ m/s}$ , 而径向扩散区的速度大约为  $1.25 \text{ m/s}$ , 是过渡区的 9.6 倍. 随着火源功率的增大, 过渡区长度虽然有所增大, 但仅是径向扩散区长度的 2.25 倍, 因此, 径向扩散区的卷吸速率大于过渡区.

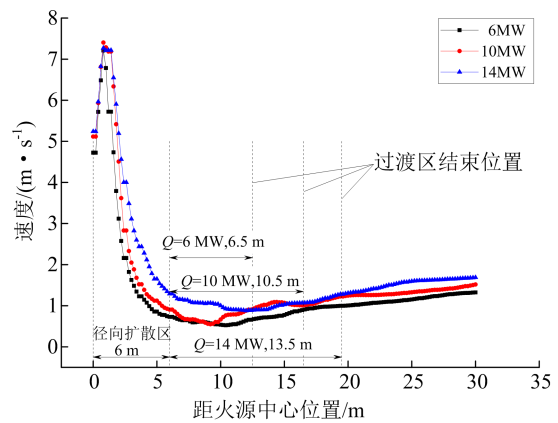


图 12 顶棚纵向中心线速度衰减曲线

Fig. 12 Velocity decay curve along ceiling vertical centerline

#### 5.2 有效顶棚高度对质量卷吸速率的影响

图 13 为火源功率为  $10 \text{ MW}$  时, 改变有效顶棚高度对截面质量流率和卷吸速率的影响. 可以看出, 有效顶棚高度的增加, 增大了羽流上升的高度, 火羽流可以充分卷吸周围空气, 火羽流质量大大增加, 进而直接导致  $\dot{m}_2$  和  $\dot{m}_3$  处的质量流率增加.

图 14 给出了不同有效顶棚高度的纵向中心线速度分布曲线. 从图 14 可以看出, 随着  $H_{ef}$  的减小, 同一位置上烟气速度有所降低, 这是由于在火焰

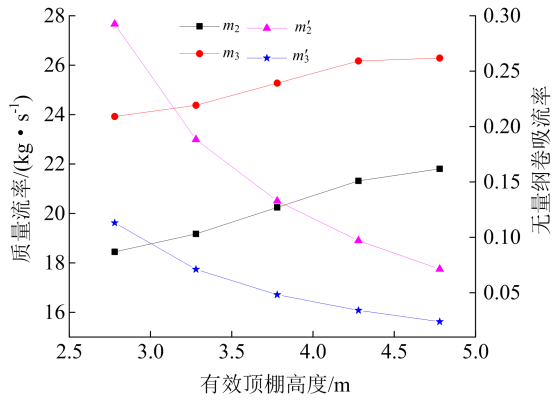


图 13 有效顶棚高度对烟气质量流率及卷吸速率的影响  
 Fig. 13 Effect of effective ceiling height on smoke mass flow rate and entrainment rate

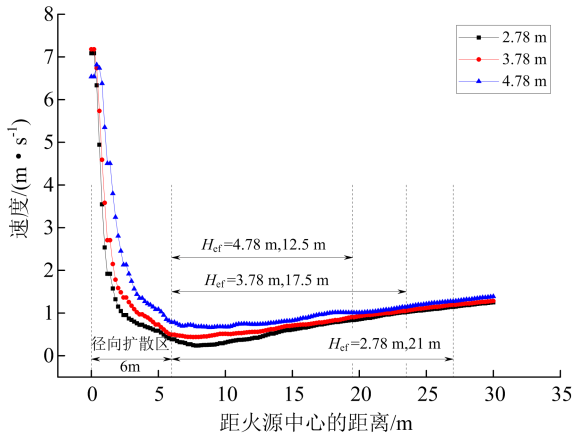


图 14 不同顶棚高度下纵向中心线速度衰减曲线  
 Fig. 14 Ceiling vertical center line velocity decay curve under different ceiling heights

区,火焰中心轴线上的速度随着高度的增加而增加,  $H_{ef}$  越小,撞击顶棚时的速度越小,导致顶棚射流速度也越小.在径向扩散区内,烟气速度急剧减小,表明烟气层内的速度场变化剧烈,湍流强度大.不同有效顶棚高度下,烟气的衰减速度有所不同,从曲线斜率可以看出,  $k_{2.78} > k_{3.78} > k_{4.78}$ ,但  $H_{ef} = 4.78\text{m}$  时的水平剪切速度大于  $H_{ef} = 3.78\text{m}, 2.78\text{m}$ ,这是因为,从图 13 中  $\dot{m}'_2$  和  $\dot{m}'_3$  的变化曲线可以看出,随着  $H_{ef}$  的增大,卷吸作用减弱,表明在该阶段,烟气层的湍流作用大于水平剪切作用.而在过渡区,同样表现出类似的现象,但随着烟气层速度场分布趋于平稳,水平剪切作用会大于湍流作用,直到一维蔓延区,水平剪切作用成为质量卷吸的主要方式.另外,随着有效顶棚高度的减小,过渡区范围增加,所产生的壁面射流长度也相应增加,二者的共同作用也会导致卷吸量的增加.

### 5.3 火源横向位置对质量卷吸速率的影响

图 15 为  $Q = 10\text{MW}$ ,改变火源横向位置时各截面及阶段的质量流率和卷吸速率.当  $Q = 10\text{MW}$  时,火源的特征直径为  $1.2\text{m}$ ,即当  $d = 0.5\text{m}$  和  $1\text{m}$  时,火焰柱与侧壁接触,此时近侧壁处不产生壁面射流,大大影响了对空气的卷吸作用.从图 15 中可以看出,  $d = 0.5\text{m}$  和  $1\text{m}$  时,  $\dot{m}_2$  和  $\dot{m}_3$  截面上的质量流率较其他情况要低,而  $d = 2\text{m}, 3\text{m}, 4\text{m}$  时截面质量流率基本保持不变,近侧壁壁面射流长度略大于远侧壁.从卷吸速率方面来看,当火焰柱不与侧壁接触时,径向扩散区与过渡区的卷吸速率基本保持一致,无量纲卷吸速率大约为  $0.06$ ;当火焰接触侧壁时,径向扩散区面积是火源位于中部时的 2 倍,随着火源位置距近侧壁距离的增加(最大不超过隧道宽度的一半),这种差异将逐渐减小,因此,火源贴壁时,径向扩散区的质量卷吸速率比其他火源位置的卷吸速率大.从模拟结果来看,火源位置的变化对阶段 III 的质量卷吸速率影响较小,可以认为保持不变.

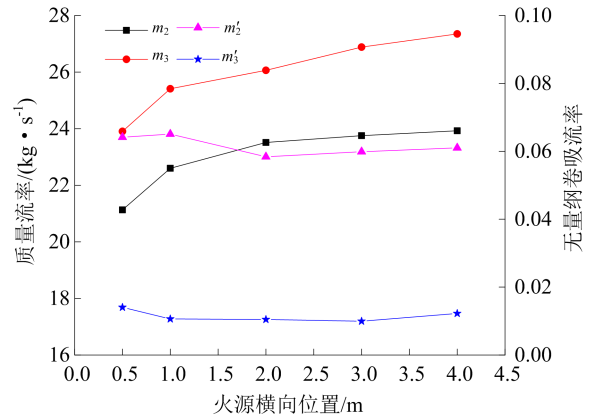


图 15 火源横向位置对烟气质量流率及卷吸速率的影响  
 Fig. 15 Influence of fire source lateral position on smoke mass flow rate and entrainment rate

### 5.4 隧道宽度对质量卷吸速率的影响

改变隧道的宽度将直接影响热烟气层与冷空气层的接触面积,从而影响各阶段的质量卷吸速率.从图 16 中可以看出,随着隧道宽度的增加,  $\dot{m}_2$  和  $\dot{m}_3$  截面上的质量流率逐渐增加;径向扩散区的质量卷吸速率也随之增加,主要是由于隧道宽度远远(以  $10\text{m}$  为例)大于火源特征直径( $Q = 10\text{MW}$  时,  $D = 2.4\text{m}$ ),继续增大隧道宽度对火羽流卷吸速率几乎没有影响,那么径向扩散区的卷吸速率  $\dot{m}'_2$  与  $\dot{m}_2$  截面上的质量流率上升趋势基本保持一致,不同的是,烟气蔓延过程处于稳态时,烟气层厚度随着隧道宽度的增加而减小,增大了火羽流的卷吸高度,产烟量将会

增加,导致  $\dot{m}_2$  截面上质量流率增加. 图 17 给出了不同隧道宽度下纵向中心线烟流速度分布曲线.

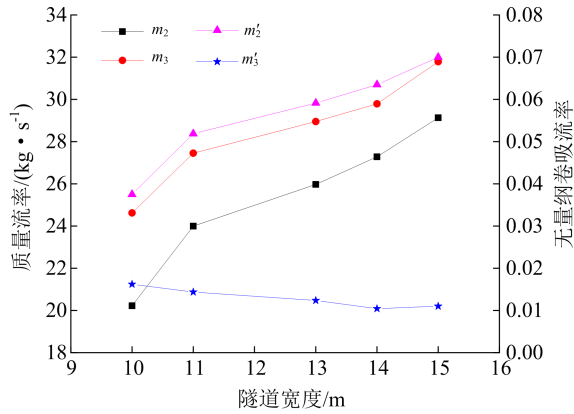


图 16 隧道宽度对烟气质量流率及卷吸速率的影响  
Fig. 16 Influence of tunnel width on smoke mass flow rate and entrainment rate

由于隧道宽度的增大,径向扩散区也随之增大,通过简单计算,如  $\omega = 10$  m 时,径向扩散区速度梯度为 0.87 m/s,  $\omega = 15$  m 时,速度梯度为 0.51 m/s,隧道宽度增加 5 m 后速度梯度是原来的 0.58 倍,烟流的平均水平剪切速度是原来的 0.89 倍,径向扩散区面积增加了  $56.25/25 = 2.25$  倍,因此,在该阶段内,冷热流体的接触面积成为卷吸速率的主导因

素. 在过渡区,隧道宽度增加时,近火源区长度几乎不受影响,径向扩散区增大导致过渡区范围减小,同时考虑该区域内速度梯度和水平速度的情况,最终结果如图 16  $\dot{m}'_3$  所示,可以看出,隧道宽度的增加对阶段 III 的卷吸作用影响不大.

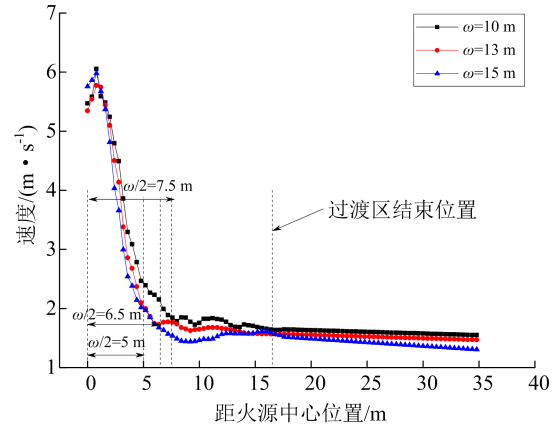


图 17 不同隧道宽度下纵向中心线烟流速度分布曲线  
Fig. 17 Smoke velocity distribution curves along longitudinal center line under different tunnel widths

### 5.5 结果分析

采用第 3 节中  $\dot{m}_e$  的计算方法计算阶段 I 的质量卷吸速率  $\dot{m}_1$ , 计算结果如表 4 所示.

表 4 截面质量流率及各阶段卷吸速率计算结果

Tab. 4 Calculation results of mass flow rate on cross section and entrainment rate of each stage

组别	编号	$\dot{m}_1$	$\dot{m}_2$	$\dot{m}_3$	$\dot{m}'_2$	$\dot{m}'_3$
G1	1	14.668	19.099	20.547	0.04886	0.00601
	2	16.810	21.498	24.240	0.05438	0.01138
	3	18.952	23.995	27.453	0.06030	0.01436
	4	20.859	26.234	30.039	0.06564	0.01580
	5	22.500	28.479	32.525	0.07156	0.01680
G2	6	16.836	21.807	26.287	0.07131	0.02386
	7	15.002	21.321	26.172	0.09703	0.03406
	8	12.744	20.246	25.275	0.13288	0.04817
	9	10.769	19.171	24.378	0.18826	0.07110
	10	8.559	18.448	23.924	0.29255	0.11306
G3	11	18.482	24.40	27.518	0.06296	0.01295
	12	18.670	24.487	27.562	0.06293	0.01277
	13	18.905	23.541	26.020	0.05851	0.01030
	14	14.665	22.856	25.290	0.06448	0.01011
	15	11.371	20.578	23.958	0.06185	0.01404



续表 4

组别	编号	$\dot{m}_1$	$\dot{m}_2$	$\dot{m}_3$	$\dot{m}'_2$	$\dot{m}'_3$
G4	16	18.435	20.921	24.123	0.04861	0.01330
	17	18.952	23.995	27.453	0.06030	0.01436
	18	19.328	25.971	28.950	0.06773	0.01237
	19	19.752	27.279	29.792	0.07228	0.01044
	20	20.222	29.131	31.784	0.07900	0.01102

根据理想羽流模型质量卷吸速率的表达式<sup>[20]</sup>, 假设  $Q^*$  的  $1/3$  次方与  $Z^*$  的  $5/3$  次方的乘积与  $\dot{m}_i^*$  仍呈线性关系, 并同时考虑无量纲火源横向位置和无量纲接触面积两个因素对卷吸速率的影响, 根据经验阶段 II、III 的卷吸模型可表达为如下形式:

$$\dot{m}_2^* = C_1 Q^{*1/3} Z^{*5/3} A_2^{*C_2} d^{*C_3} \quad (14)$$

$$\dot{m}_3^* = C_4 Q^{*1/3} Z^{*5/3} A_3^{*C_5} d^{*C_6} \quad (15)$$

式中,  $C_1 \sim C_6$  为待定系数. 通过对表 2、3、4 中数据进行非线性拟合, 得到上述待定系数, 见式 (16)、(17), 拟合效果如图 18、图 19 所示.

$$\dot{m}_2^* = 0.073 Q^{*1/3} Z^{*5/3} A_2^{*1.070} d^{*0.288} \quad (16)$$

$$\dot{m}_3^* = 0.010 Q^{*1/3} Z^{*5/3} A_3^{*1.069} d^{*0.304} \quad (17)$$

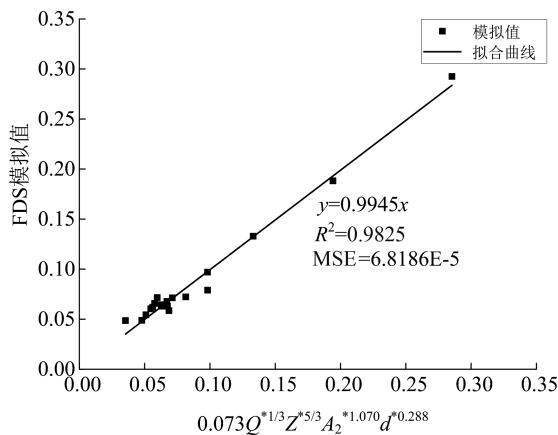


图 18 径向扩散区卷吸速率拟合曲线

Fig. 18 Fitting curve of entrainment rate in the radial diffusion zone

从图 18 和 19 可以看出, FDS 模拟值与预测模型计算值位于  $y=x$  的直线附近, 相关度系数均在 0.95 以上, 拟合效果好. 从无量纲火源功率和卷吸高度指数来看, 选择  $1/3$  和  $5/3$  分别作为  $Q^*$  和  $Z^*$  的指数可以得到理想的拟合结果, 与经典羽流卷吸模型保持高度的相似性. 由于本文考虑了热烟气与冷空气的接触面积和横向火源位置对卷吸速率的影响, 从拟合指数来看, 接触面积的增大一定程度上将会增大卷吸速率, 而火源距侧壁距离越小, 卷吸速率会越小. 值得注意的是,  $\dot{m}_2^*$  和  $\dot{m}_3^*$  模型中 A 和

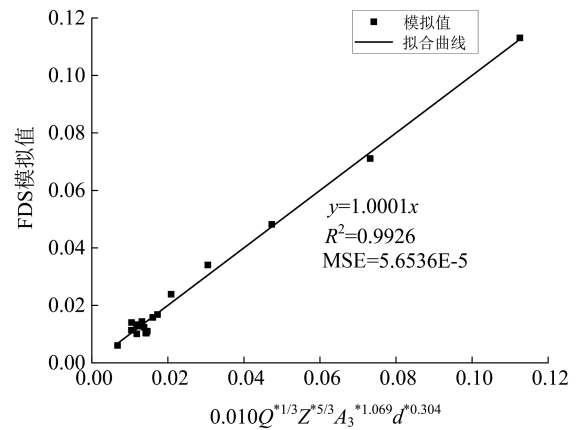


图 19 过渡区卷吸速率拟合曲线

Fig. 19 Fitting curve of entrainment rate in the transition zone

$d$  的指数比较接近, 分别约为 1.07 和 0.30, 表明接触面积和横向位置的改变对这两个阶段的卷吸速率影响程度基本相同. 假定这两个指数取值相同, 那么, 对于一个火灾场景, 径向扩散区的卷吸速率将是过渡区卷吸速率的  $\dot{m}_2^*/\dot{m}_3^* = 7.3A_2^*/A_3^*$  倍,  $A_2^*/A_3^* = d/(L_d - d)$ . 近火源区长度越长, 径向扩散区卷吸速率所占比率约小, 反之越大, 符合隧道火灾的实际情况. 为了与文献[12]中模型进行对比, 将式(2)、(3)根据实验条件整理成式(14)的形式, 不难发现, 对于小功率火源情况,  $\dot{m}_2^*$  和  $\dot{m}_3^*$  的关联常数分别为 0.0463 和 0.0055, 只有大火源功率模型的 0.55 和 0.63 倍, 表明对较大火源功率的隧道火灾, 烟气对空气的卷吸强度要大于小功率火灾情况.

## 6 结论

本文通过数值模拟, 对不同阶段烟气卷吸模型进行了研究, 得出以下结论:

(I) 前人提出的烟气在蔓延过程中阶段 II、III 的质量卷吸速率模型, 对于小功率火源具有高的准确性, 但对于火源功率较大的隧道火灾事故具有局限性;

(II) 采用集气罩法测定了火源近场区质量卷吸

速率,用离散化方法对阶段Ⅱ、Ⅲ截面质量流率进行了计算,提高了结果的准确性;

(Ⅲ)通过量纲分析对影响Ⅱ、Ⅲ阶段烟气质量卷吸速率的因素进行探究,得出四组无量纲数  $Q^*$ 、 $A^*$ 、 $d^*$ 、 $Z^*$  是质量卷吸速率的主要影响因素,根据前人经验提出它们之间存在  $\dot{m}_2^* = C_1 Q^{1/3} Z^{*5/3} A_2^{C_2} d^{C_3}$  和  $\dot{m}_3^* = C_4 Q^{1/3} Z^{*5/3} A_3^{C_5} d^{C_6}$  的关系,通过数据拟合得出了相关系数  $C_1 = 0.073$ ,  $C_4 = 0.010$ ,  $C_2 \approx C_5 \approx 1.070$ ,  $C_3 \approx C_6 \approx 0.300$ , 提出了Ⅱ、Ⅲ阶段烟气质量卷吸速率的计算方法。

#### 参考文献(References)

- [1] HU L H, ZHOU J W, HUO R, et al. Confinement of fire-induced smoke and carbon monoxide transportation by air curtain in channels[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 156: 327-334.
- [2] ZUKOSKI E E, KUBOTA T, CETEGEN B. Entrainment in fire plumes[J]. Fire Safety Journal, 1981, 3(3): 107-121.
- [3] CETEGEN B M, ZUKOSKI E E, KUBOTA T. Entrainment in the near and far field of fire plumes[J]. Combustion Science and Technology, 1984, 39: 305-331.
- [4] ZUKOSKI E E. Properties of fire plumes [M]// Combustion Fundamentals of Fire. London: Academic Press, 1995: 101-219.
- [5] MCCAFFREY B J. Purely Buoyant Diffusion Flames: Some Experimental Results [R]. Washington D. C. Nation Bureau of Standards, 1979: NBSIR 79-1910.
- [6] MCCAFFREY B J. Momentum implications for buoyant diffusion flames[J]. Combustion & Flame, 1983, 52(2): 149-167.
- [7] HESKESTAD G. Dynamics of the fire plume [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society B Biological Sciences, 1998, 356(1748): 2815-2833.
- [8] 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(3): 227-242.
- [9] 王浩波, 纪杰, 钟委, 等. 长通道内烟气一维水平蔓延阶段质量卷吸系数的实验研究[J]. 工程力学, 2009, 26(11): 247-251.
- WANG Haobo, JI Jie, ZHONG Wei, et al. Experimental study on air entrainment coefficient during one-dimensional horizontal movement of fire-induced smoke in long channels [J]. Engineering Mechanics, 2009, 26(11): 247-251.
- [10] HU L H, PENG W, HUO R. Critical wind velocity for arresting upwind gas and smoke dispersion induced by near-wall fire in a road tunnel [J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, 150(1): 68-75.
- [11] KUNSCH J P. Simple model for control of fire gases in a ventilated tunnel[J]. Fire Safety Journal, 2002, 37(1): 67-81.
- [12] 纪杰, 霍然, 张英, 等. 长通道内烟气层水平蔓延阶段的质量卷吸速率实验研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2009, 39(7): 738-742.
- JI Jie, HUO Ran, ZHANG Ying, et al. Experimental study on the entrainment mass flow rate across the smoke layer interface during horizontal spread in a long channel [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2009, 39(7): 738-742.
- [13] 纪杰. 地铁站火灾烟气流动及通风控制模式研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2008.
- [14] 张少刚. 地铁列车对区间隧道火灾逆流烟气输运特性影响的研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.
- [15] 李垣志, 牛国庆, 张轩轩. 城市公路隧道近火源区长度的研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2017, 13(12): 43-51.
- LI Yuanzhi, NIU Guoqing, ZHANG Xuanxuan. Research on length of area near fire source in urban highway tunnel fire [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2017, 13(12): 43-51.
- [16] 周魁斌. 火旋风的燃烧规律及其火焰移动机制研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2013.
- [17] STECKLER K D, QUINTIERE J G, RINKINEN W J. Flow induced by fire in a compartment [J]. Symposium on Combustion, 1982, 19(1): 913-920.
- [18] 陈长坤, 姚斌. 室内火灾区域模拟烟气羽流模型的适用性[J]. 燃烧科学与技术, 2008, 14(4): 295-299.
- CHEN Changkun, YAO Bin. Applicability of the plume models for the zone modeling of the smoke in compartment fires [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2008, 14(4): 295-299.
- [19] 张学魁, 胡冬冬, 李思成, 等. 火灾烟气生成量的实验测量及其工程计算方法[J]. 消防技术与产品信息, 2006(10): 21-26.
- [20] 易亮. 中庭式建筑中火灾烟气的流动与管理研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2005.