

文章编号: 1671-6612 (2019) 06-597-08

纵向风作用下隧道断面尺寸 对火灾烟气分层的影响

郭宇豪 袁中原 袁艳平

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

【摘要】 隧道火灾中较大的纵向风速会破坏火源下游烟气分层, 对下游人员逃生不利。然而, 维持下游烟气分层的合理风速未知; 隧道断面尺寸对烟气分层影响也尚不清楚。利用 FDS, 对纵向风作用下 5 个不同断面尺寸隧道内烟气分层规律进行研究。结果发现: Newman 无量纲温度比模型适用于宽高比在 0.5 至 3 范围内的隧道; 维持下游烟气分层的最大风速随隧道宽度增大而增大, 而与高度无明显关系; 烟气分层与 Froude 数的关系与隧道断面尺寸相关, 造成 Hyman 模型与 FOA-SP 模型试验结果无法吻合的原因可能是隧道宽高比的不同; 烟气层高度与隧道断面尺寸相关, 当风速较大时, 宽度的增加会使烟气层出现剧烈波动。

【关键词】 烟气分层; 隧道断面尺寸; 纵向通风; 隧道火灾

中图分类号 U453.5 文献标识码 A

Effect of Tunnel Cross Section on Smoke Stratification under Longitudinal Velocities

Guo Yuhao Yuan Zhongyuan Yuan Yanping

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

【Abstract】 The large longitudinal velocity in tunnel fires will destroy the downstream smoke stratification, which is not conducive to evacuation of tunnel users in the downstream. However, the reasonable velocity to maintain smoke stratification is unknown. And the effect of tunnel cross section on smoke stratification is unclear. The relationship between tunnel cross section and smoke stratification is studied by using FDS. The main conclusions include: The dimensionless temperature ratio model of Newman is suitable for tunnels in the range of 0.5 to 3 of the aspect ratios; The maximum velocity which maintain downstream smoke stratification increases with the increase of tunnel width, but has no obvious relationship with tunnel height; The relationship between smoke stratification and Froude number is related to tunnel cross section. The reason why Hyman model cannot be matched with FOA-SP model test results may be the difference of tunnel aspect ratio. The smoke layer height is related to the cross section. When the velocity is large, the increase of tunnel width will cause the smoke layer to fluctuate violently.

【Keywords】 smoke stratification; cross section; longitudinal velocity; tunnel fire

0 引言

隧道火灾纵向通风中, 火源下游人员一直处于较不利地位。下游烟气分层与纵向风速关系密切,

当风速较小时, 下游烟气可以维持较好的分层结构^[1]。而当风速增大, 下游烟气分层结构将受到影响。目前, 以临界风速为标准的通风模式可以有效阻止

基金项目: 建筑环境与能源高效利用四川省青年科技创新研究团队项目(2015TD0015);

国家自然科学基金青年基金项目(51708454)

作者简介: 郭宇豪(1994-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: YuhaoGuo@swjtu.edu.cn

通讯作者: 袁艳平(1973-), 男, 博士后, 教授, 博士生导师, E-mail: ypyuan@home.swjtu.edu.cn

收稿日期: 2019-05-10

烟气向上游蔓延。然而，较大的风速可能会破坏火源下游烟气分层^[2]，不利于下游人员逃生。因此，探究合理的纵向风速以控制下游烟气分层对人员逃生至关重要。

Newman^[3]认为隧道中烟气分层可以通过无量纲温度比 $\Delta T_{cf}/\Delta T_{avg}$ 和 $\Delta T_{cf}/\Delta T_h$ 进行判断，提出的关系式可近似整理为如下分段形式：

$$\begin{cases} \frac{\Delta T_{cf}}{\Delta T_h} = 1 & \frac{\Delta T_{cf}}{\Delta T_{avg}} > 1.7 \\ \frac{\Delta T_{cf}}{\Delta T_h} = 0.67 \left(\frac{\Delta T_{cf}}{\Delta T_{avg}} \right)^{0.77} & \frac{\Delta T_{cf}}{\Delta T_{avg}} \leq 1.7 \end{cases} \quad (1)$$

其中， $\Delta T_{cf} = T_c - T_f$ ； $\Delta T_h = T_c - T_a$ ； $\Delta T_{avg} = T_{avg} - T_a$ 。 T_c 、 T_f 分别代表隧道顶、底部温度，K； T_{avg} 、 T_a 分别代表平均温度和环境温度，K。当 $\Delta T_{cf}/\Delta T_{avg} > 1.7$ 时， $\Delta T_{cf} \approx \Delta T_h$ ，此时隧道底部近似为环境温度，表明烟气存在明显分层；当 $\Delta T_{cf}/\Delta T_{avg} < 1.7$ 时， $\Delta T_{cf} < \Delta T_h$ ，此时隧道底部温度升高，表明烟气分层不明显。Newman 将烟气分层明显区域称为 Region I，将分层不明显区域称为 Region II。

除此之外，Newman 提出了 Froude 数 (Fr) 与无量纲温度比 $\Delta T_{cf}/\Delta T_{avg}$ 的关系式：

$$\Delta T_{cf}/\Delta T_{avg} = 1.5Fr^{-1} \quad (2)$$

其中：

$$Fr = \frac{u_{avg}}{\sqrt{gH \Delta T_{cf}/T_{avg}}} \quad (3)$$

$$u_{avg} = u T_{avg}/T_a \quad (4)$$

u_{avg} 为断面平均风速，m/s； u 为纵向风速，

(1)

m/s。结合式 (1) 和式 (2)，Newman 提出 $Fr < 0.9$ 时烟气分层明显。

Hyman 和 Ingason^[4]通过分析 FOA-SP、Ingason 模型试验及 Runehamar、Memorial 大尺寸试验，验证了式 (1) 的准确性。然而，Hyman 得

到的 $\Delta T_{cf}/\Delta T_{avg}$ 与 Froude 数的关系却与式 (2) 不

一致。Hyman 等人^[4]提出的关系式为：

$$\Delta T_{cf}/\Delta T_{avg} = 0.62Fr^{-1.58} \quad (5)$$

由此，Hyman 给出 $Fr < 0.55$ 时烟气分层明显。值得注意的是，Hyman 分析的各隧道断面宽高比（隧道宽度除以隧道高度）在 1.1 至 2 范围内，而其中宽高比为 2 的 FOA-SP 模型试验与式

(5) 吻合较差。

一直以来，隧道断面尺寸作为重要参数影响着隧道内的烟气流动，受到学者广泛关注^[5,6]。在烟气分层方面，Tang^[7]、Gannouni^[8]等人研究了阻塞存在时隧道内的烟气分层状况；Tang 和 Li^[9,10]等人研究了纵向风与顶部排风口协同作用下隧道内的烟气分层情况。然而，鲜有学者对隧道断面尺寸与烟气分层的系进行研究。

基于此，本文以 Newman 理论为基础，从烟气分层的角度出发，采用 FDS 数值模拟研究纵向通风条件下隧道断面尺寸对烟气分层的影响，探究不同断面尺寸下维持下游良好分层的合理风速范围。

1 数值计算模型

1.1 模型及工况

本文计算了 5 种不同断面尺寸的隧道。火源均位于隧道底部中轴线上。火源上、下游长度为 200m。在一些风速较大的工况，由于上游回流长度很短，因此将上游隧道长度减少至 100m 以节约计算资源。以火源中心为原点建立坐标系，其中火源上游为负，下游为正。隧道进风端以“SUPPLY”定义速度边界；出风端以“OPEN”定义压力边界。隧道壁面为混凝土。湍流模型选用大涡模拟。

隧道几何结构及计算工况如表 1 所示，其中隧道宽高比 AR (aspect ratio) 为隧道宽度 W 除以隧道高度 H ($AR = W/H$)。火源功率均为 10MW；计算时长为 360s。

表 1 隧道几何结构及计算工况

Table 1 Tunnel geometric structure and simulation conditions

隧道编号	隧道高度 (m)	隧道宽度 (m)	宽高比 AR	风速 (m/s)
A	5	7.5	1.5	1.0~3.0
B	5	10	2	1.0~3.0
C	5	15	3	1.0~3.0
D	7.5	5	0.67	1.0~3.0
E	10	5	0.5	1.0~2.6

注：计算风速间隔为 0.2m/s

1.2 网格划分

火源特征直径 D^* ^[11]是关于网格划分较为重要的参数，其计算式如 (6) 所示：

$$D^* = \left(\frac{Q}{\rho_0 c_p T_0 \sqrt{g}} \right)^{2/5} \quad (6)$$

式中, Q 为火源功率, kW。李颖臻^[12]选用 $0.075 D^*$ 网格尺寸进行验证和计算。其验证结果与模型实验结果吻合较好。考虑到计算的准确性及计算时长, 本文选用 $0.07 D^*$ 进行计算。

1.3 计算方法验证

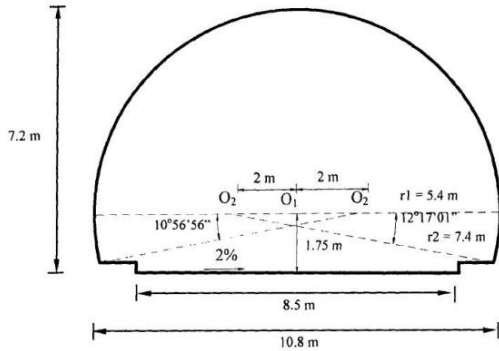


图 1 元江一号隧道断面尺寸^[13]

Fig.1 Cross section of YuanJiang 1# tunnel

本文参考胡隆华^[13]全尺寸试验元江一号隧道 Test 9 进行计算方法验证。元江一号隧道位于我国云南省境内, 隧道断面尺寸如图 1 所示。由于计算机运算能力的限制, 本文只取一段隧道进行验证, 其中火源上游取 220m, 火源下游取 250m, 全长 470m。火源位于隧道中轴线上, 距地面高 0.2m。验证工况火源功率 3.2MW, 纵向风速 0.5m/s, 环境温度 25℃。验证内容为火源下游顶棚下方温度分布。验证结果如图 2 所示。可以看到, 顶棚下方温度模拟结果与试验吻合较好, 说明 FDS 能较好反应隧道内的温度分布情况。

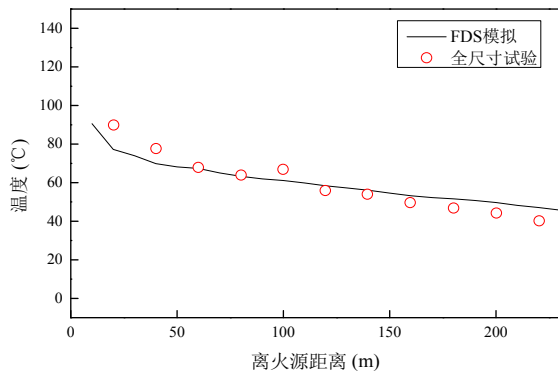


图 2 顶棚下方温度模拟结果与试验对照

Fig.2 Comparison of ceiling temperature distribution between FDS simulation and Hu's test

2 计算结果及分析

2.1 烟气分层状况

纵向风影响着隧道内的烟气分层。一般情况下, 较小风速下烟气分层较好。以高 5 m 宽 7.5 m 的隧道 A 为例, 图 3 展示了不同纵向风速下隧道内的分层情况。可以看到, 当风速为 1.0m/s 时, 火源上游有较长的回流, 此时上、下游烟气具有清晰的分层。当风速为 1.8m/s 时, 上游烟气逆流得到有效限制, 而下游烟气分层状况较差。当风速为 2.6m/s 时, 烟气无逆流, 下游分层几乎不存在。一般情况下, 纵向风作用下火源上游回流烟气分层较为明显^[12]。本文主要讨论火源下游的分层情况。

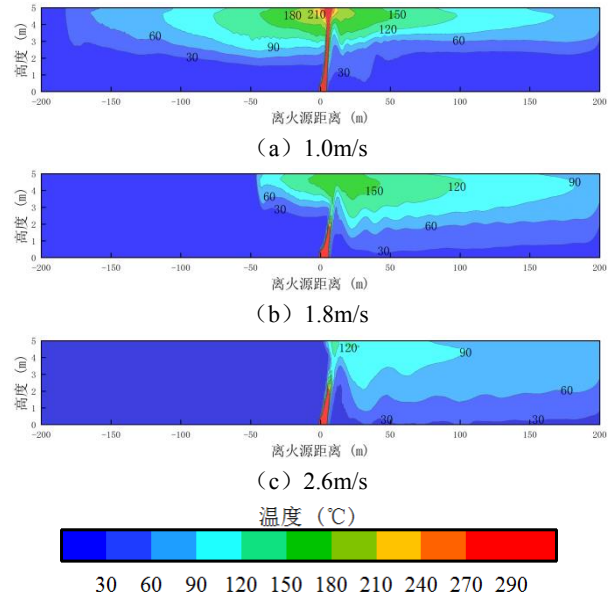
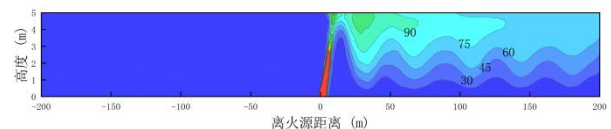


图 3 隧道 A, 不同纵向风速下烟气分层

Fig.3 Smoke stratification of tunnel A with different longitudinal velocity

图 4 展示了风速 2.6 m/s 时, 不同隧道内的烟气分层情况。对于较宽的 B、C 隧道, 火源下游烟气具有分层, 但伴随有明显的波动现象; 较高的 D、E 隧道下游烟气无明显分层。当风速为 2.6m/s 时, 隧道 C 下部空间依然为环境温度, 说明其烟气分层依然存在; 而由图 3(c), 隧道 A 在风速 2.6m/s 的工况下无明显分层。这说明了在较大风速下, 隧道宽度的增加有利于烟气维持分层, 但此时烟气层出现波动现象。



(a) 隧道 B, 高 5m 宽 10m

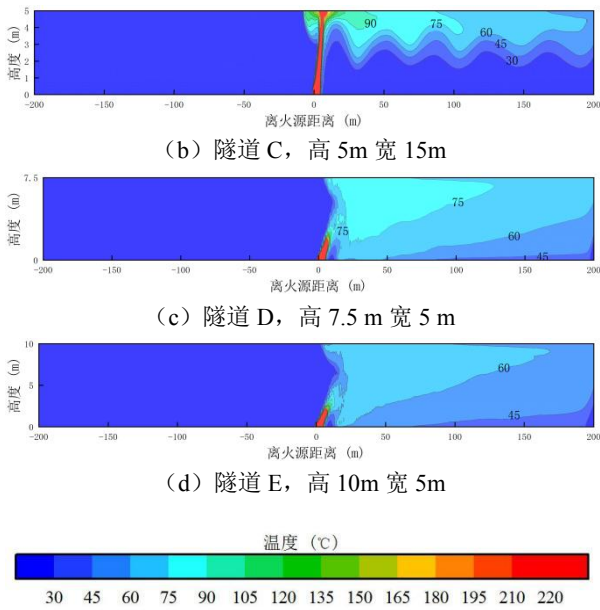


图 4 风速 2.6m/s, 不同隧道内烟气分层

Fig.4 Smoke stratification of different tunnels when velocity is 2.6 m/s

基于 Newman 的理论, 式 (1) 可以反映烟气的分层状况。图 5 为无量纲温度比模拟结果与式 (1) 对照情况。可以看到, 不同隧道模拟结果与式 (1) 较为吻合。这表明 Newman 烟气分层模型可以用于宽高比在 0.5 至 3 范围内的隧道。本文将参照式 (1), 以 $\Delta T_{cf}/\Delta T_{avg}$ 为标准对烟气分层状况进行判断。

图 6 展示了不同隧道内火源下游烟气分层状况。当风速为 1.2 至 1.4m/s 时, 隧道 A 至 E 中 $\Delta T_{cf}/\Delta T_{avg}$ 均大于 1.7, 说明此时烟气分层明显。当风速为 1.6m/s 时, 风速增大使得不同隧道中 $\Delta T_{cf}/\Delta T_{avg}$ 均减小, 其中 A、D、E 隧道中 $\Delta T_{cf}/\Delta T_{avg}$ 已接近于 1.7。当风速为 1.8m/s 时, 隧道 A、D、E 中 $\Delta T_{cf}/\Delta T_{avg}$ 均小于 1.7, 表明此时 A、D、E 隧道中烟气分层变得不明显。当风速为 2.0m/s 时, 除隧道 C 外, 其余隧道中 $\Delta T_{cf}/\Delta T_{avg}$ 均小于 1.7, 烟气分层不明显。同时, D、E 隧道靠近火源一侧受火源影响, 烟气紊乱, 导致 $\Delta T_{cf}/\Delta T_{avg}$ 极小; 隧道 B、C 中 $\Delta T_{cf}/\Delta T_{avg}$ 出现波动现象。这是由于较大的风速使得宽高比较大的隧道中烟气层上下波动。当风速增至 2.2m/s 时, 仅隧道 C 中 $\Delta T_{cf}/\Delta T_{avg}$ 大于 1.7。

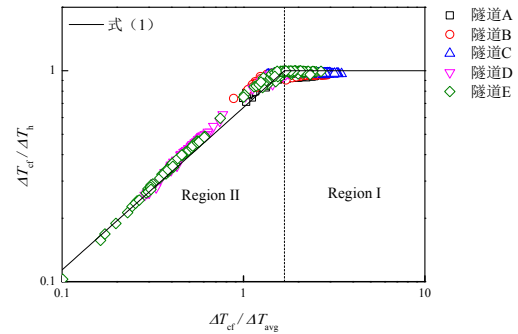
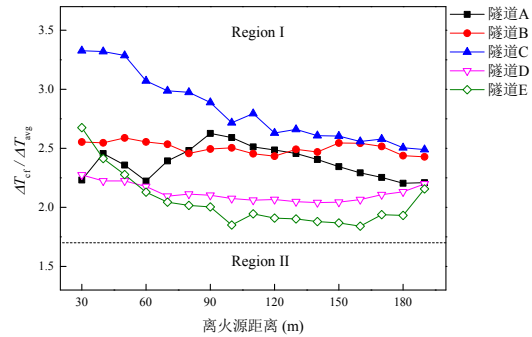
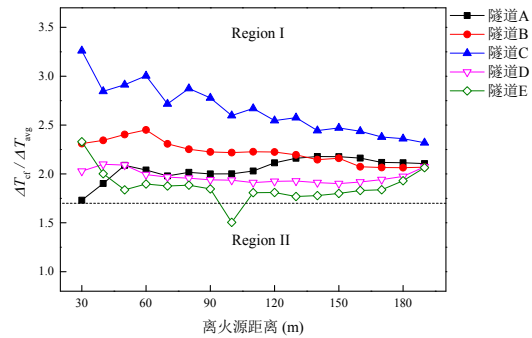


图 5 无量纲温度比模拟结果与 Newman 模型对照

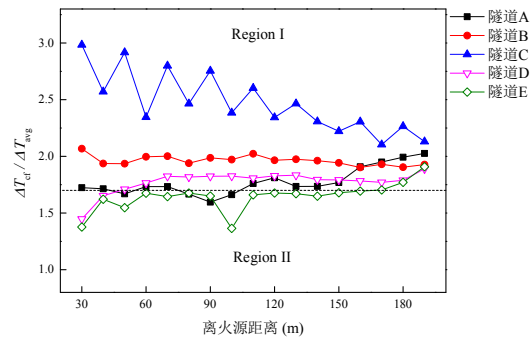
Fig.5 Comparison of dimensionless temperature ratio between FDS simulation and Newman's model



(a) 风速 1.2m/s



(b) 风速 1.4m/s



(c) 风速 1.6m/s

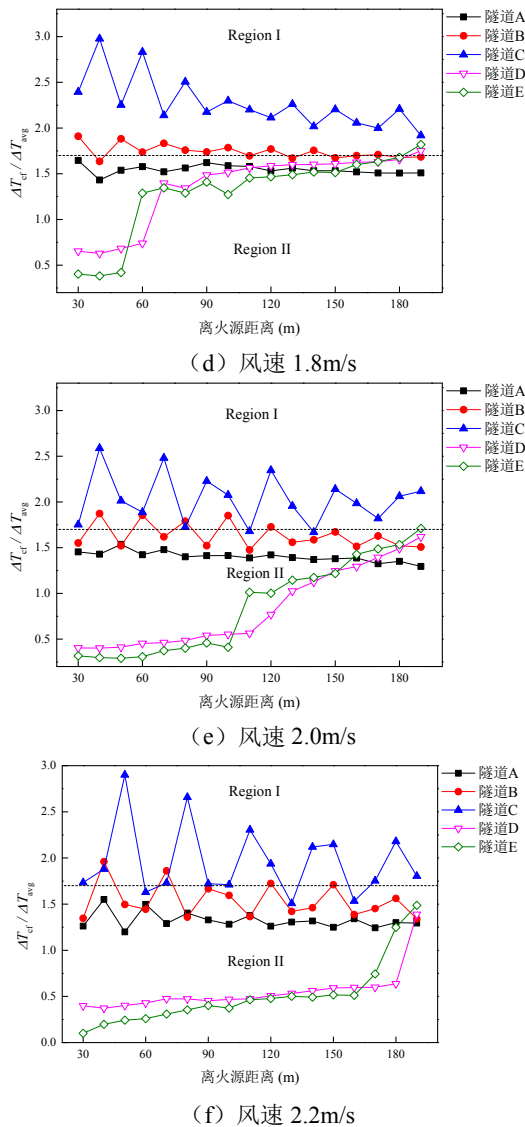


图 6 不同隧道内火源下游烟气分层状况

Fig.6 Smoke stratification of downstream in tunnels

由图 6 可得除隧道 C 外其余隧道中维持下游烟气分层明显的最大风速。而对于隧道 C, 情况较为不同。由于其宽高比较大, 在较大风速下, 烟气层将出现明显的波动现象。图 7 展示了隧道 C 无量纲温度比 $\Delta T_{cf}/\Delta T_{avg}$ 与 $\Delta T_{cf}/\Delta T_h$ 在不同风速下的情况。可以看到, 隧道 C 在风速 1.0 至 3.0m/s 范围内 $\Delta T_{cf}/\Delta T_h$ 几乎均为 1, 这意味着隧道 C 底部近似为环境温度, 说明烟气分层一直存在, 为方便讨论, 认为隧道 C 中维持烟气分层的最大风速为 3.0m/s。因此, 由图 6 和图 7, 可得隧道 A、B、C、D、E 中维持烟气分层的最大风速, 分别为 1.6m/s、1.8m/s、3.0m/s、1.6m/s、1.6m/s。对比隧道 A、B、C 及 D、E 发现, 维持下游烟气分层明显的最大风

速随隧道宽度的增加而增加, 但与隧道高度无明显关系。

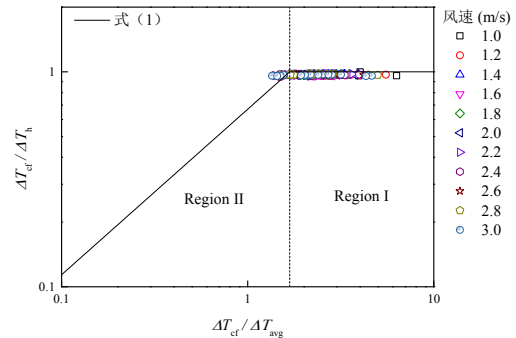


图 7 不同风速下隧道 C 中无量纲温度比

Fig.7 Dimensionless temperature ratio of tunnel C with different velocities

2.2 烟气分层状况与 Froude 数的关系

根据 Newman^[3]和 Hyman^[4]的理论, 火源下游 Froude 数与烟气分层的关系可通过式 (7) 拟合。

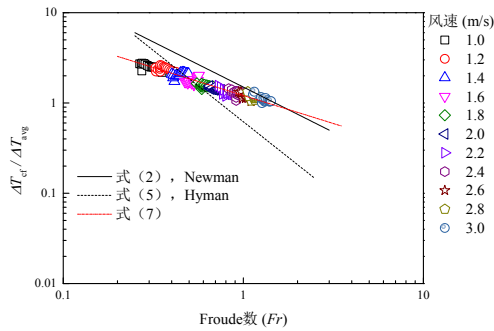
$$\Delta T_{cf}/\Delta T_{avg} = aFr^{-b} \quad (7)$$

Froude 数计算参照式 (3)。不同隧道中 Froude 数与烟气分层的关系拟合结果如图 8 所示。可以看到, 不同隧道中 Froude 数与烟气分层的关系不一致, 主要表现为通过式 (7) 拟合得到的系数 a 、 b 不一致。由于系数 a 、 b 存在差异, 这将导致划分烟气分层明显与烟气分层不明显的 Fr 数不同。不同隧道中式 (7) 拟合结果及划分烟气分层明显与否的 Fr 数见表 2。对于隧道 C, 当风速较大时, 下游烟气层出现明显的波动现象, 导致温度比 $\Delta T_{cf}/\Delta T_{avg}$ 波动较大, 因此隧道 C 中 Froude 数与 $\Delta T_{cf}/\Delta T_{avg}$ 的关系无法通过式 (7) 较好拟合, R^2 仅为 0.53。对于隧道 D、E, 当纵向风速较小, Fr 小于 0.8 时, $\Delta T_{cf}/\Delta T_{avg}$ 与 Fr 关系与本文模型更为吻合; 而当风速增大, Fr 大于 0.8 时, $\Delta T_{cf}/\Delta T_{avg}$ 与 Fr 的关系与式 (5) 更为接近。

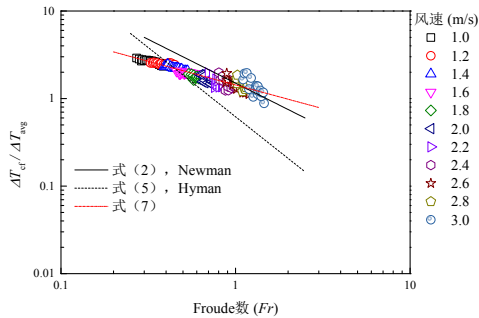
表 2 不同隧道中式 (7) 拟合结果及 Fr 数

Table 2 Eq. (7) fitting results and Fr number in different tunnels

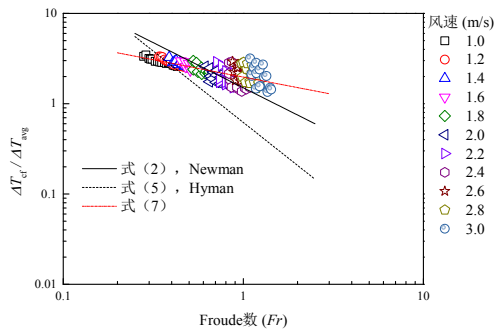
	宽高比	a	b	R2	Fr
隧道 A	1.5	1.21	0.62	0.94	0.58
隧道 B	2	1.43	0.54	0.89	0.73
隧道 C	3	1.97	0.39	0.53	-
隧道 D	0.67	0.75	0.9	0.92	0.40
隧道 E	0.5	0.69	0.92	0.90	0.38



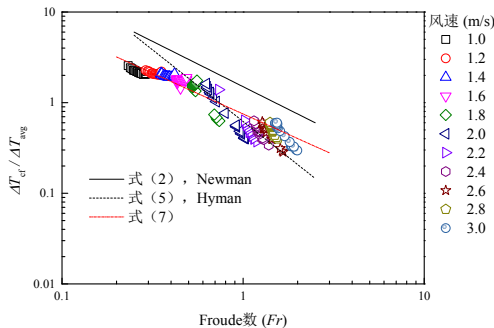
(a) 隧道 A, 高 5m 宽 7.5m



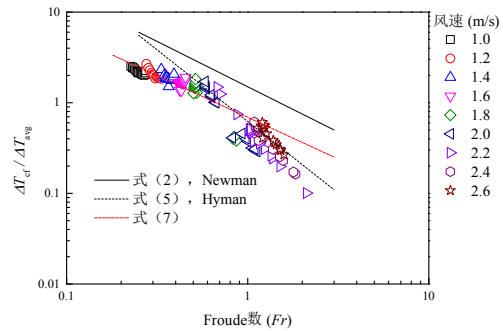
(b) 隧道 B, 高 5m 宽 10m



(c) 隧道 C, 高 5m 宽 15m



(d) 隧道 D, 高 7.5m 宽 5m



(e) 隧道 E, 高 10m 宽 5m

图 8 不同隧道中 Froude 数与烟气分层关系

Fig.8 Smoke stratification-Froude number diagram in different tunnels

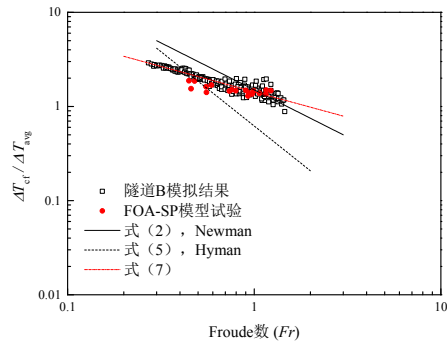


图 9 烟气分层与 Froude 数关系模拟结果与 FOA-SP 试验对照

Fig.9 Comparison of smoke stratification-Froude between FDS simulations and FOA-SP model tests

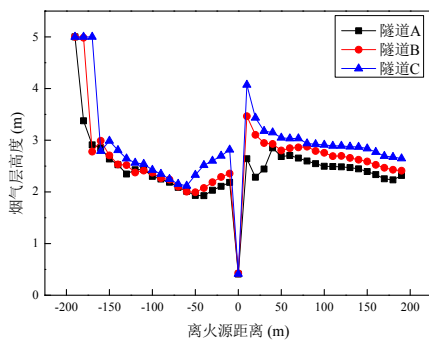
图 9 为隧道 B 模拟结果与 FOA-SP 模型试验结果中烟气分层与 Froude 数关系的比较。可以看到, 两者吻合度较高。FOA-SP 模型试验^[4]隧道长×高×宽=20m×1m×2m; 相似比为 1:8; 宽高比为 2。试验工况火源功率为 30kW 至 80kW, 风速为 0.5m/s 至 1.0m/s。对应的全尺寸隧道火源功率约为 5.4 至 14.5MW, 风速约为 1.4 至 2.8m/s, 与本文隧道 B (宽高比为 2) 工况相似。Hyman 没有解释 FOA-SP 模型试验与式 (5) 无法吻合的原因。从模拟结果可以看到, 可能正是由于隧道宽高比的不同导致 Froude 数与 $\Delta T_{cf}/\Delta T_{avg}$ 关系不同。对于不同断面尺寸的隧道, 式 (7) 中系数 a 、 b 会发生变化。

2.3 烟气层高度变化情况

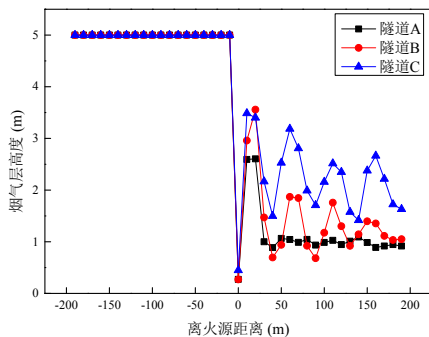
烟气层高度是较为重要的物理量。火灾中将有毒热烟气与人员逃生路径相分离将有助于人员疏散。本文采用 FDS 内置的烟气层高度计算方法^[11]

输出烟气层高度进行讨论。

图 10 展示了隧道宽度对烟气层高度的影响。在风速较小, 为 1.0m/s 时, 对于火源上游, 回流长度较长, 在回流烟气中部, 烟气局部降低。此时, 隧道宽度的增加对上游烟气层高度无明显影响; 对于火源下游, 烟气层高度随隧道宽度的增加有所升高。在风速较大, 为 3.0m/s 时, 对于上游, 无烟气回流; 对于下游, 较宽隧道的烟气层出现较为明显的波动现象, 烟气层高度起伏不定。对于隧道 A、B, 此时由于风速较大, 烟气分层可能被破坏, 因此 FDS 输出的烟气层高度较低。



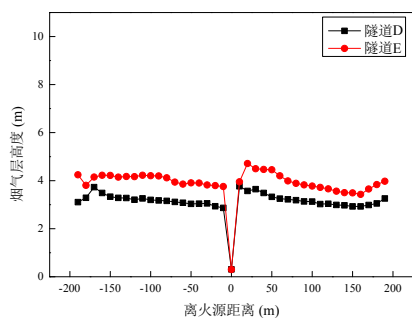
(a) 风速 1.0 m/s



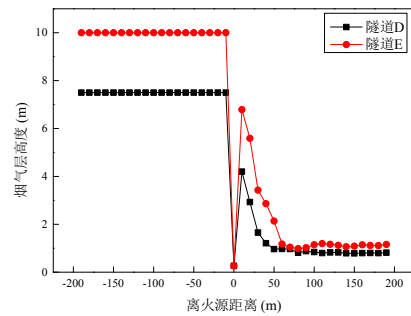
(b) 风速 3.0 m/s

图 10 隧道宽度对烟气层高度的影响

Fig.10 Effect of tunnel width on smoke layer height



(a) 风速 1.0m/s



(b) 风速 2.6m/s

图 11 隧道高度对烟气层高度的影响

Fig.11 Effect of tunnel height on smoke layer height

图 11 展示了隧道高度对烟气层高度的影响。在风速较小, 为 1.0m/s 时, 隧道高度的增加均会使得火源上、下游烟气层高度升高。且 D、E 隧道中上游未出现烟气层局部降低现象。而当风速较大, 为 2.6m/s 时, 上游无烟气回流, 下游烟气分层被破坏, FDS 输出的烟气层高度很低, 此时隧道高度对烟气层高度无明显影响。

对下游 50m 至 150m 烟气层较稳定段取平均, 得不同纵向风速、不同隧道中下游烟气层平均高度, 如图 12 所示。烟气层平均高度随风速的增大逐渐减小, 其中风速在 1.4 至 2.0m/s 范围内烟气层平均高度变化最快。风速超过 2.0m/s 后, 烟气层平均高度变化较小。对于隧道 C, 较大风速下下游烟气层将出现上下波动的现象, 因此烟气层平均高度在风速大于 2.6m/s 时有小幅度的上升。对于宽高比小于 1 的隧道 D、E, 在风速小于 1.2m/s 时烟气层平均高度要比宽高比大于 1 的隧道 A、B、C 的高。而随着风速增大, 宽高比小于 1 的隧道烟气层平均高度急剧下降。当风速大于 2.0m/s 后, D、E 隧道的烟气层平均高度整体小于 A、B、C 隧道的。

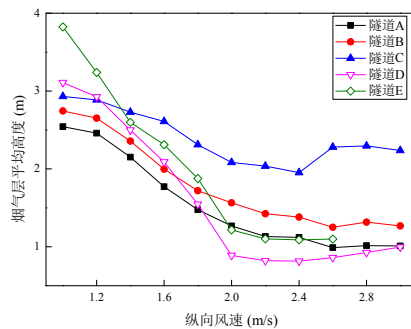


图 12 下游烟气层平均高度随风速变化情况

Fig.12 Variation of average smoke layer height downstream with velocities

3 结论

本文以 Newman 的理论为基础,采用 FDS 进行数值计算,讨论了纵向风作用下宽高比为 0.5 至 3 的隧道中断面尺寸对烟气分层的影响,得到的结论包括:

(1) 验证了 Newman 无量纲温度比关系式的准确性,该关系式适用于宽高比在 0.5 至 3 范围内的隧道;

(2) 维持下游烟气分层明显 (Region I) 的最大风速与隧道断面尺寸相关。该风速随隧道宽度的增大而增大;而与隧道高度无明显关系;

(3) 无量纲温度比与 Froude 数的关系与隧道断面尺寸相关,这将导致不同断面尺寸的隧道中用以判断烟气分层明显与否的 Froude 数不同。造成 FOA-SP 模型试验结果与 Hyman 结论无法吻合的原因可能是隧道宽高比的不同。然而,当隧道宽高比为 3 时,无法得到无量纲温度比与 Froude 数的关联式。

(4) 相同风速下烟气层高度与隧道断面尺寸相关。风速较小时,隧道高度的增加会使上、下游烟气层高度均升高,而宽度的增加仅会使下游烟气层高度升高。风速较大时,隧道高度的增加对烟气层高度无明显影响;宽度的增加会使烟气层高度相对升高,但会出现剧烈的上下波动。

参考文献:

- [1] 胡隆华,霍然,王浩波,等.公路隧道内火灾烟气温度及层化高度分布特征试验[J].中国公路学报,2006,19(6): 79-83.
- [2] 刘帅,陈建忠,王芳其.公路隧道纵向通风对火灾烟气分层影响研究[J].地下空间与工程学报,2018,14(5):278-282.
- [3] Newman J S. Experimental evaluation of fire-induced stratification[J]. Combustion and Flame, 1984,57(1): 33-39.
- [4] Nyman H, Ingason H. Temperature stratification in tunnels[J]. Fire Safety Journal, 2012,48(1):30-37.
- [5] Vauquelin O, Wu Y. Influence of tunnel width on longitudinal smoke control[J]. Fire Safety Journal, 2006,41(6):420-426.
- [6] Li Y Z, Ingason H. Effect of cross section on critical velocity in longitudinally ventilated tunnel fires[J]. Fire Safety Journal, 2017.
- [7] Tang F, He Q, Shi Q, et al. Experimental study on thermal smoke layer thickness with various upstream blockage-fire distances in a longitudinal ventilated tunnel[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2017:141-148
- [8] Gannouni S, Zinoubi J, Maad R B, et al. Numerical study on the thermal buoyant flow stratification in tunnel fires with longitudinal imposed airflow: Effect of an upstream blockage[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2019:230-242.
- [9] Li L J, Tang F, Dong M S, et al. Effect of ceiling extraction system on the smoke thermal stratification in the longitudinal ventilation tunnel[J]. Applied Thermal Engineering, 2016,109:312-317.
- [10] Tang F, Li L J, Dong M S, et al. Characterization of buoyant flow stratification behaviors by Richardson (Froude) number in a tunnel fire with complex combination of longitudinal ventilation and ceiling extraction[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 110:1021-1028.
- [11] McGrattan K, Hostikka S, McDermott R, et al. Fire dynamics simulator - User's guide[M]. NIST Special Publication 1019, Sixth Edition. Maryland: NIST, 2017.
- [12] 李颖臻.含救援站特长隧道火灾特性及烟气控制研究[D].成都:西南交通大学,2010.
- [13] 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.