

文章编号: 1671-6612 (2019) 02-172-06

地铁山岭隧道事故排烟方案效果的对比分析

路伟鹏

(中铁第六勘察设计院集团有限公司 天津 300308)

【摘要】 借助火灾模拟软件 Pyrosim, 建立了全尺寸的隧道和列车模型, 研究了车厢内尾部发生火灾工况下纵向排烟和半横向排烟方案的排烟效果: 至火灾发生 900s 时, 纵向排烟方案下人员疏散至隧道内车头位置后便处于安全区域, 半横向排烟方案下人员疏散至火源左侧第一个排烟口或车头范围以外便处于安全区域; 纵向排烟方案人员完全疏散出车厢可用安全疏散时间比半横向排烟方案多约 370s, 人员疏散至安全区域可用安全疏散时间比半横向排烟方案多约 640s。

【关键词】 地铁; 山岭隧道; 纵向排烟; 半横向排烟; 排烟效果; 可用安全疏散时间

中图分类号 U231+.5 文献标识码 A

Comparative and Analysis of Smoke Exhaust Effects on Mountain Tunnel of Railway

Lu Weipeng

(China Railway Liuyuan Group Co., Ltd, Tianjin, 300308)

【Abstract】 With the fire simulation software Pyrosim, a full-size tunnel and train model was established, and the smoke exhaust effect of longitudinal ventilation and semi-transverse ventilation schemes when fire broke out in the tail of the carriage were studied: When the fire occurred for 900 seconds, people evacuate to the front of the train in the tunnel will be safe under longitudinal ventilation scheme, and evacuate to the first exhaust outlet on the left of the fire or outside of the front will be safe under semi-transverse scheme. The available safety egress time for people to evacuate out of the carriage and evacuate to safety area under longitudinal ventilation is respectively 370 seconds and 640 seconds longer than the semi-transverse scheme.

【Keywords】 railway; mountain tunnel; longitudinal ventilation; semi-transverse ventilation; smoke exhaust effect; available safety egress time

0 引言

随着城市经济的快速增长, 中国的地铁规模不断扩大, 城市周边区域不断延伸, 山岭隧道不断涌现。由于地铁客流量大、人员集中, 同时山岭隧道内空间相对封闭, 一旦发生火灾, 若不能及时排除烟气, 极易造成人员伤亡和财产损失。因此, 研究地铁山岭隧道火灾工况下有效的排烟和疏散方案极为重要。

地铁隧道设计和研究中普遍采用的排烟方式为纵向排烟和半横向排烟。朱常琳^[1]通过数值模拟与实验的方法研究了半横向排烟方式中排烟风速、

排烟口间距及排烟口面积对排烟效果的影响。易亮^[2]对火灾半横向排烟的烟气流动进行了理论分析, 并建立实验室模型进行火灾试验得出排烟阀的设置原则。周孝清^[3]对采用纵向排烟方式下, 隧道内烟气温度和 CO 浓度的分布情况进行了数值模拟。朱伟^[4]建立了纵向排烟实验台, 研究了火源功率和纵向排烟风速对隧道内温度分布的影响。

国内外学者对地铁隧道纵向排烟和半横向排烟均做了大量研究, 但对于纵向排烟与半横向排烟效果的对比分析较少。本文通过建立数值模型, 对两种排烟方案下车厢内及隧道内烟气发展规律进

行研究分析和对比，以期制定更为有效的排烟和疏散方案提供参考。

1 人员安全疏散的评判标准

火灾时产生的高温有毒烟气是影响人员安全的主要因素，特征值主要表现为烟气的温度、CO浓度及能见度。本文参照 NFPA130、《中国消防手册》及相关研究文献[5]，制定人员安全疏散的评判标准为：人眼特征高度处的最高温度不超过 60℃；人眼特征高度处的 CO 浓度不超过 250ppm；人眼特征高度处的能见度不小于 10m。人眼特征高度取疏散平台以上 2.0m。

2 火源参数设置

列车车厢内发生火灾主要是由乘客携带的行李等移动载荷引起的，根据杨昀[6]的建议确定火源热量释放速率为 5MW。火灾选为 t^2 火灾，火灾增长系数 $a=0.047$ (kW/s²)，经计算火源达到稳定燃烧的时间为 386s。

3 模型建立

根据《地铁设计防火标准》的要求，长度大于一列列车长度的地下区间和全封闭车道应设置排烟设施，同时考虑到缩短模拟时间，本文确定研究的隧道长度为 400m。本文采用 Pyrosim 软件建立了全尺寸的隧道和列车模型。隧道净宽度为 4.6m，净高度为 6.6m。列车长度为 140m，共 6 节车厢，每节车厢设置 5 个 1.4m×1.86m 的车门。横向排烟方案的隧道模型内部设置排烟道，排烟道内净高度为 1.4m，排烟道底板上间隔 30m 设置 1m×2m 的排烟口，火灾时排烟口全部开启。火源设置于车厢内尾部，位于隧道中心里程处。车厢内火源上方人眼特征高度处设置温度、CO 浓度及能见度探测点，由车尾向车头方向间隔 10m 设置对应的测点；隧道内疏散平台上方人眼特征高度处设置温度、CO 浓度及能见度探测点，向隧道两端间隔 10m 设置对应的测点。

3.1 通风设备参数确定

纵向通风时为避免火灾时烟气顺着下游方向扩散，隧道内最小风速应大于临界风速。临界风速的理论计算公式通常采用 Heselden&Kennedy^[7]公式。针对不同的隧道界面尺寸，Ris^[8]对上述公式进

行了修正，公式如下：

$$V_c = K_g K \left[\frac{g \bar{H} Q}{r_\infty C_p A_r T_f} \right]^{1/3} \quad (1)$$

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

$$\bar{H} = 4A / L \quad (3)$$

$$A_r = \pi \bar{H}^2 / 4 \quad (4)$$

式中， V_c 为临界风速，m/s； $K_g=1+0.0374(\text{grade})^{0.8}$ 为坡度修正系数，根据《地铁设计规范》，在山地城市的特殊地形地区，线路最大坡度可采用 40‰，确定本文取坡度为 4%； $g=9.81\text{m/s}^2$ ； H 为截面净高，6.6m； Q 为火源热量释放速率， $5 \times 10^6\text{W}$ ； ρ_∞ 为空气密度， 1.2kg/m^3 ； C_p 为空气定压比热， $1005\text{J/kg}\cdot\text{K}$ ； A 为隧道净截面积， 30.36m^2 ； T_f 为热空气温度； $K=0.61$ ； T_∞ 为周围空气温度， 293K ； \bar{H} 为隧道界面当量高度，m； L 为断面湿周长，m； A_r 为隧道通风当量面积， m^2 。

经计算临界风速 $V_c=1.98\text{m/s}$ 。同时，根据《地铁设计防火标准》的要求，采用纵向通风时，区间断面的排烟风速不应小于 2m/s，不得大于 11m/s。因此，本文取断面排烟风速 2m/s，计算排烟量为 $60.7\text{m}^3/\text{s}$ ，风机选型排烟量为 $72.8\text{m}^3/\text{s}$ 。本文在模型中隧道两端（隧道内距口部 50m 处）各设置两台风机，单台风机风量为 $36.4\text{m}^3/\text{s}$ ，形成隧道内从车头至车尾方向的纵向气流。

半横向排烟时隧道两端各设置两台风量为 $36.4\text{m}^3/\text{s}$ 的风机，风机出风口方向相反，共同对隧道进行排烟。

3.2 网格划分及模拟时间

有研究表明，模拟中采用 $0.1D^*$ 的网格尺寸较符合实际情况^[9,10]。 D^* 为火灾特征直径，根据 FDS 指导手册中的公式进行计算，公式如下：

$$D^* = \left(\frac{Q}{\rho_\infty C_p T_\infty \sqrt{g}} \right)^{2/5} \quad (5)$$

式中， Q 为火源热量释放速率， 5000kW ； ρ_∞ 为空气密度， 1.2kg/m^3 ； C_p 为空气定压比热， $1.005\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$ ； T_∞ 为周围空气温度， 300K ；

$g=9.81m/s^2$ 。经计算 D^* 约为 2m，因此本文网格尺寸定为 $0.2m \times 0.2m \times 0.2m$ 。

本文模拟时间取 900s；火灾发生 30s 时，风机启动。

4 模拟结果分析

4.1 烟气蔓延情况对比与分析

纵向排烟方案烟气蔓延情况如图 1 所示。火灾

发生 36s 时，车厢内的烟气开始蔓延至隧道内；567s 时，烟气蔓延至充满整个车厢。

半横向排烟方案烟气蔓延情况如图 2 所示。火灾发生 55s 时，车厢内的烟气开始蔓延至隧道内；198s 时，烟气蔓延至充满整个车厢。

从两种方案的对比来看，纵向排烟方案烟气进入隧道的时间较早，但烟气蔓延至充满整个车厢的时间较晚。

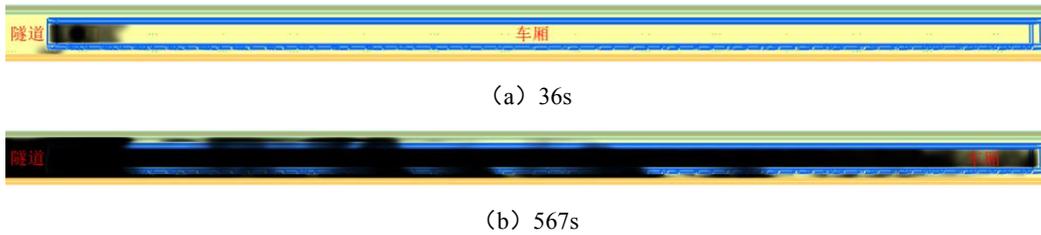


图 1 纵向排烟方案烟气蔓延情况

Fig.1 Smoke spread in longitudinal ventilation

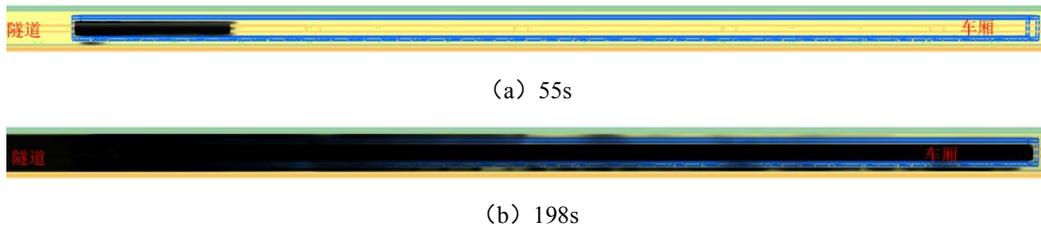


图 2 半横向排烟方案烟气蔓延情况

Fig.2 Smoke spread in semi- transverse ventilation

图 3 为不同排烟方案下车厢内风速分布图。纵向排烟方案下，车厢内大部分区域形成了 3m/s 的

气流半横向排烟方案下，车厢内大部分区域的风速在 0.3m/s 左右。

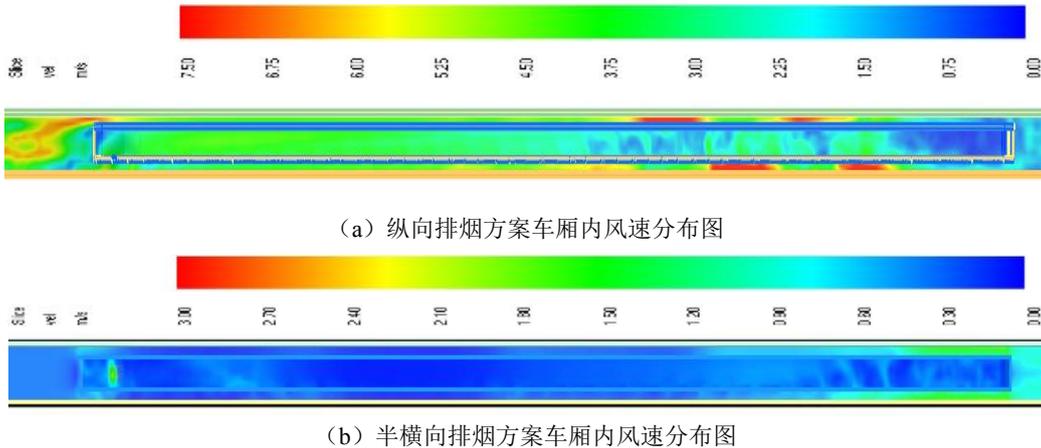


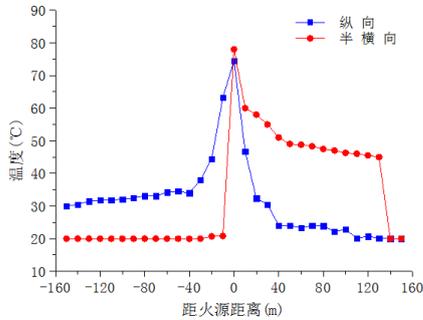
图 3 不同排烟方案下车厢内风速分布图 (60s)

Fig.3 Wind speed distribution in the carriage in different ventilation schemes (60s)

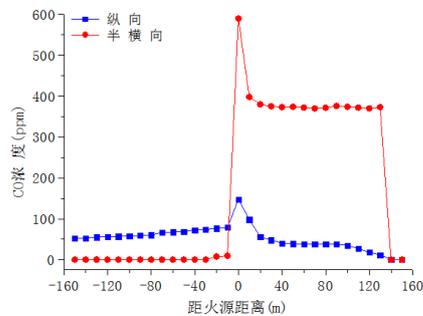
笔者认为纵向排烟方案时隧道内的纵向气流通过开启的车门在车厢内形成一定程度的纵向风速。因此，火灾初期，车厢内的纵向气流在较短的

时间内便将烟气吹至室外；同时，由于纵向气流的存在，抑制了车厢内烟气向车头方向的快速蔓延。半横向排烟时，由于车厢内不存在有规模的气流扰

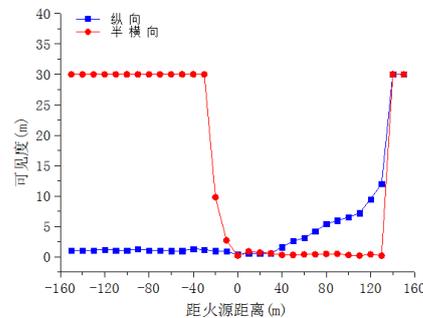
动，且车门与车厢顶部存在一定高度的车体，这部分车体形成一道挡烟垂壁，烟气更易于在车厢内部蔓延，车厢顶部烟气厚度大于挡烟垂壁高度时，烟气才蔓延至隧道内。



(a) 温度



(b) CO 浓度



(c) 能见度

图 4 不同排烟方案下隧道内温度、CO 浓度、能见度分布 (900s)

Fig.4 Temperature, concentration of CO and visibility in the tunnel in different ventilation schemes (900s)

图 4 为 900s 时不同排烟方案下疏散平台上人眼特征高度处纵向温度、CO 浓度、能见度分布。火源位于车厢尾部，车头方向距火源距离为正值，其中距火源距离-10~130m 为车体在隧道内的位置。纵向排烟工况下，距火源距离大于 130m 时，人眼特征高度处温度、CO 浓度和能见度均不超过限定值，可以认为人员疏散至车头位置处便处于

安全区域。半横向排烟工况下，-30m~130m 范围内人眼特征高度处温度、CO 浓度和能见度会有超过限值的情况，其中-30m 处为火源左侧第一个排烟口的位置，可以认为人员疏散至火源左侧第一个排烟口或车头范围以外便处于安全区域。

半横向排烟方案下，隧道内车厢尾部在火灾发生 55s 时便出现烟气，人员在 55s 后向车尾方向疏散，将存在安全问题。因此，本文着重研究两种排烟方案下车厢内车头位置处和隧道内车头位置处烟气温度、CO 浓度、能见度达到限值的时间，以得出人员完全疏散出车厢和疏散至安全区域的可用安全疏散时间。

4.2 人员完全疏散出车厢可用安全疏散时间分析

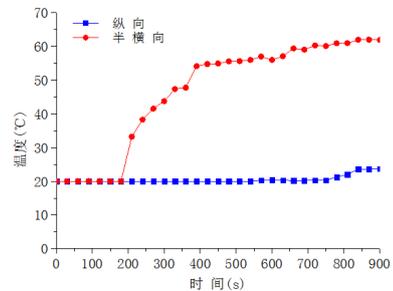


图 5 不同排烟方案下车厢头部温度随时间变化情况

Fig.5 Temperature in the head of carriage changes over time in different ventilation schemes

图 5 为不同排烟方案下车厢头部温度随时间变化情况。纵向排烟时，由于隧道内较低温度的空气通过车厢头部开启的车门进入车厢，温度稳定在 20~24°C 范围内；半横向排烟时，车厢头部温度从 200s 左右开始上升，并在 720s 时温度超过 60°C。

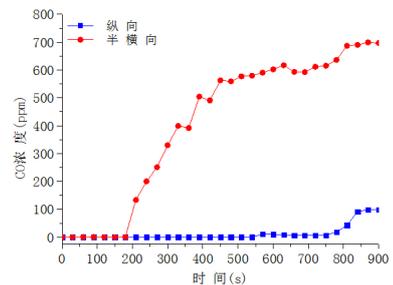


图 6 不同排烟方案下车厢头部 CO 浓度随时间变化情况

Fig.6 Concentration of CO in the head of carriage changes over time in different ventilation schemes

图 6 为不同排烟方案下车厢头部 CO 浓度随时间变化情况。纵向排烟时，CO 浓度处在 0~80ppm 范围内；半横向排烟时，CO 浓度从 200s 左右开始上升，并在 270s 时超过 250ppm。

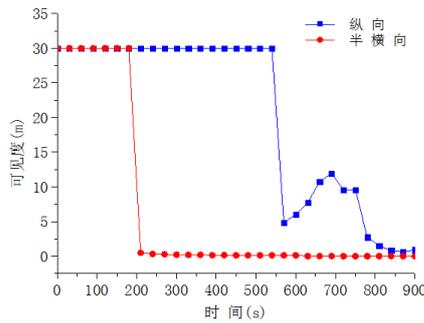


图 7 不同排烟方案下车厢头部可见度随时间变化情况

Fig.7 Visibility in the head of carriage changes over time in different ventilation schemes

图 7 为不同排烟方案下车厢头部可见度随时间变化情况。纵向排烟时，可见度在 570s 左右降低至 10m 以下，由于从车门处进入的气流扰动作用，在随后的 130s 内可见度有所回升，但随着烟气的增加，可见度持续下降；半横向排烟时，可见度从 200s 左右快速下降，并维持在 0.5m 以内。

综合车厢头部人眼特征高度处烟气温度的、CO 浓度、可见度情况可知：纵向排烟工况下，温度和 CO 浓度始终未超过限值，但在 570s 时可见度达到 10m 以下；半横向排烟工况下，200s 时可见度率先达到限值。因此，纵向排烟方案人员完全疏散出车厢可用安全疏散时间较半横向排烟方案长约 370s。

4.3 人员疏散至安全区域可用安全疏散时间分析

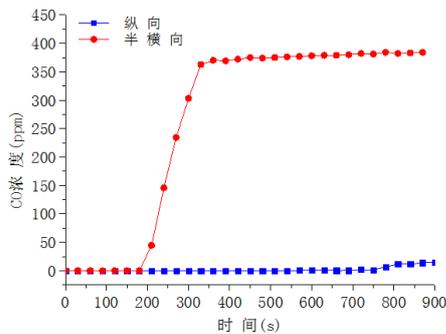


图 8 不同排烟方案下车头位置疏散平台上方 CO 浓度随时间变化情况

Fig.8 Concentration of CO above the evacuation platform next to front of the train changes over time in different ventilation schemes

由图 4 可知，不同排烟方案下，900s 时隧道内车头位置（130m 处）的温度均未超过 60℃。因此本文仅对车头位置疏散平台上方人眼特征高度处的 CO 浓度和可见度进行研究。

图 8 为不同排烟方案下车头位置疏散平台上

方 CO 浓度随时间变化情况。纵向排烟时，CO 浓度始终保持在较低的浓度；半横向排烟时，CO 浓度从 200s 左右开始上升，并在 270s 时超过 250ppm。

图 9 为不同排烟方案下车头位置疏散平台上方可见度随时间变化情况。纵向排烟时，可见度在 700s 左右开始下降，并在 840s 左右降至 10m 以下。半横向排烟时，可见度从 200s 左右快速下降，并维持在 0.5m 以内。

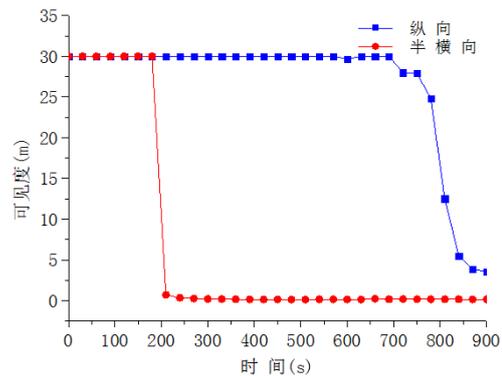


图 9 不同排烟方案下车头位置疏散平台上方可见度随时间变化情况

Fig.9 Visibility above the evacuation platform next to front of the train changes over time in different ventilation schemes

综合车头位置疏散平台上方人眼特征高度处 CO 浓度、可见度情况可知：纵向排烟工况下，CO 浓度始终未超过限定值，但在 840s 时可见度达到 10m 以下；半横向排烟工况下，CO 浓度在 300s 时超过 250ppm，200s 时可见度低于 10m，与车厢内失去安全疏散条件的的时间基本相同。因此，纵向排烟方案人员疏散至安全区域可用安全疏散时间较半横向排烟方案长约 640s。

5 结论

在本文的研究工况下，通过对纵向排烟和半横向排烟方案下的烟气蔓延情况、人员完全疏散出车厢可用安全疏散时间和人员疏散至安全区域可用安全疏散时间进行对比分析，得出以下结论。

(1) 纵向排烟方案下，人员疏散超过隧道内车头位置处处于安全区域；半横向排烟方案下，人员疏散至火源左侧第一个排烟口或车头范围以外处于安全区域。纵向排烟和半横向排烟方案均能

将烟气控制在一定区域内,但纵向排烟方案效果更好,有利于人员疏散。

(2) 纵向排烟方案人员疏散至安全区域可用的安全疏散时间比半横向排烟方案多约 640s。因此,地铁轨道交通山岭隧道建议优先考虑采用纵向排烟方案。

参考文献:

- [1] 朱常琳,李昂,王立军.地铁区间隧道半横向通风排烟方式对排烟效果的影响[J].安全与环境学报,2016,16(6): 121-125.
- [2] 易亮,李沿宗,徐志胜.半横向排烟下隧道火灾烟气控制效果试验研究[J].防灾减灾工程学报,2011,31(1):86-90.
- [3] 周孝清,赵成军,赵相相.地铁区间隧道火灾烟气流动控制的数值模拟分析[J].广州大学学报,2008,10(5):66-70.
- [4] 朱伟,周晓峰,胡隆华,等.纵向风对隧道火灾拱顶最高温度及其位置的影响[J].安全与环境学报,2012,12(3): 142-145.
- [5] 蔡崇庆.地铁车站双存车线处的烟控系统研究[J].暖通空调,2015,45(7):18-22,17.
- [6] 杨昀,曹丽英.地铁火灾场景设计探讨[J].自然灾害学报, 2006,15(4):121-125.
- [7] SES Users Manual V4.1,2001:9-4.
- [8] De Ris J. Duct fires[J].Combustion and Science Technology, 1970,142(2):239-258.
- [9] LIN C J, CHUAH Y K.A study on long tunnel smoke extraction strategies by numerical simulation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology,2008, 23(5):522-530.
- [10] 张会冰.不同壁面边界条件对隧道火灾模拟结果的影响[D].成都:西南交通大学,2007.