

# 不同通风模式下隧道酒精池火热传递过程

张培红<sup>1</sup>, 董家斌<sup>1</sup>, 孟岐<sup>1</sup>, 张芸栗<sup>2</sup>

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 沈阳城市建设学院 市政与环境工程系, 辽宁 沈阳 110168)

**摘 要:** 为分析不同通风模式对于池火热传递过程的影响,在隧道模型内进行直径 0.5 m 酒精池火实验,测试和对比燃料质量损失速率、火场温度、火焰辐射热和对流换热热通量.结果表明:在 0.5 m/s 纵向排烟模式下,旺盛阶段连续火焰区火焰辐射热通量比自然通风条件增加了 30% 左右,这对火灾热传递过程控制不利.在 0.8, 1 m/s 纵向排烟条件下,旺盛阶段连续火焰区火焰辐射热通量及上部热烟气层温度显著降低.0.5 m/s 顶部排烟显著降低了旺盛阶段连续火焰区火焰辐射热通量,火灾最晚达到旺盛阶段,较早进入衰减阶段.0.5 m/s 顶部排烟是本实验条件下最佳的排烟模式.

**关 键 词:** 池火;顶部排烟;纵向排烟;辐射热通量;烟气温度

**中图分类号:** TK 121 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2017)10-1491-05

## Heat Transfer Process of Ethanol Pool Fire Under Different Ventilation Conditions in Tunnel

ZHANG Pei-hong<sup>1</sup>, DONG Jia-bin<sup>1</sup>, MENG Qi<sup>1</sup>, ZHANG Yun-li<sup>2</sup>

(1. School of Resources & Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Department of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Urban Construction University, Shenyang 110168, China. Corresponding author: ZHANG Pei-hong, professor, E-mail: zhangpeihong@mail.neu.edu.cn)

**Abstract:** To analyze the effect of various ventilation modes on heat transfer process of pool fire, fire tests in 0.5 m diameter ethanol pool were conducted in the tunnel model. Mass loss rate of fire source, fire temperature field, radiation and convection heat flux of flame were measured and analyzed. The results showed that 0.5 m/s longitudinal smoke discharge plays a negative role in the control of fire heat transfer process, the radiant heat flux of persistent flame at the developed stage of fire is 30% bigger than that under natural ventilation condition. Under 0.8, 1 m/s longitudinal smoke discharge conditions, the radiant heat flux of the persistent flame and the upper smoke layer temperature decreased significantly at the developed stage of fire. 0.5 m/s top smoke discharge mode significantly reduced the radiant heat flux of persistent flame, in which fire precedes into the strong stage at the latest and into the decay stage earlier. 0.5 m/s top smoke discharge is the most premium ventilation mode.

**Key words:** pool fire; top smoke discharge; longitudinal smoke discharge; radiation heat flux; smoke temperature

与自然通风状态下油池火的发展相比,机械通风环境中油池火热传递过程呈现特殊规律.各国学者研究了不同尺寸、不同通风环境中不同种类燃料池火的发展和热传递模式,得到了很多差异较大甚至相反的结论<sup>[1-7]</sup>. Hamins 等<sup>[1]</sup>认为不同直径油池火的发展主要受燃烧过程中热传递模式的影响. Babrauskas<sup>[2]</sup>认为无风条件下直径小

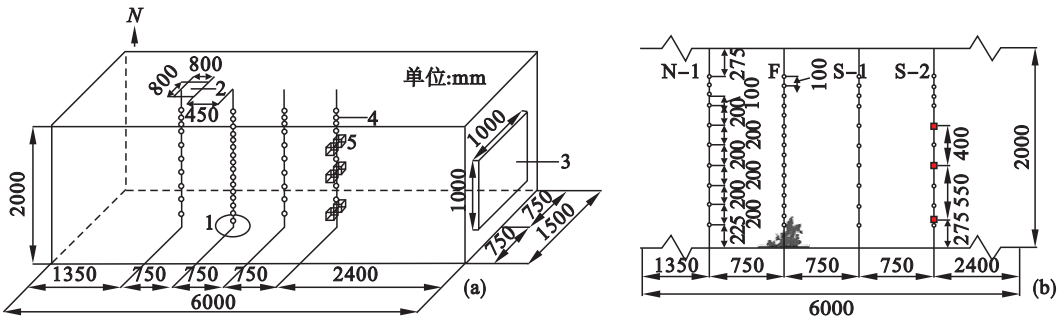
于 0.2 m 的油池火的发展以对流换热模式为主,直径大于 0.2 m 的油池火以辐射换热模式为主. May 等<sup>[3]</sup>把油池火源视为点源,火焰的热辐射按照平方指数衰减并引燃周围可燃物. Beyler<sup>[4]</sup>分析了通风条件对火焰高度、倾角及热辐射的影响,建议将重碳氢燃料的油池火焰分成羽流底部的发光火焰和上部烟气羽流部分. Miguel<sup>[5]</sup>认为上部

烟气羽流区域的平均辐射强度 ( $40\text{ kW/m}^2$ ) 与池火半径和燃料类型无关, 发光火焰区域的平均辐射强度 ( $80\sim120\text{ kW/m}^2$ ) 取决于燃料类型和油池半径. McCaffrey<sup>[6]</sup> 利用直径  $30\text{ cm}$  甲烷燃烧器进行实验, 提出将火焰划分为连续火焰区、间歇火焰区和浮力羽流区, 建立了经典火羽流模型. Nasr<sup>[7]</sup> 通过直径  $0.26\text{ m}$  和  $0.3\text{ m}$  庚烷池火实验, 认为燃料表面接受到的热反馈、火焰的辐射热和对流热通量与受限空间通风和火焰根部氧气供应情况有关. 在隧道自身通风系统和车辆行驶造成的活塞风的耦合作用下, 隧道火灾发展和蔓延呈现更为特殊和复杂的特点. 在隧道火灾事故应急处置和救援过程中, 多次发生由于应急通风排烟系统处置不当造成事故后果严重程度加剧的案例. 文献[8-12]通过全尺寸、小尺寸模型实验和数值模拟方法, 研究了不同通风排烟方式下, 不同规模和种类隧道火灾热释放速率、火焰的最高温度、顶棚下方烟气最高温度、烟气控制临界风速等. 本文在

自然通风、纵向排烟和顶部排烟条件下进行了隧道火灾实验. 对比分析不同通风模式下, 隧道油池火不同区域火焰和周围环境热传递的模式, 以及通风系统对隧道池火发展和热传递过程的控制.

# 1 实验设计

按照某单洞公路隧道宽度和高度  $1:3$  比例尺建立实验模型, 受实验室条件限制, 长度无法按比例尺缩减, 通过隧道实验模型排烟风机风口压力调节, 实现对长度的修正. 隧道火灾实验模型的主体尺寸为  $6\text{ m}\times1.5\text{ m}\times2\text{ m}$ , 见图 1a. 根据火灾动力学, 池火的热释放速率受火源类型、火源表面直径大小及通风条件等因素影响显著. 选用了发烟量较小且本身含有氧原子的酒精作为燃料进行实验. 对于柴油等发烟量较大的其他不同类型燃料池火的燃烧特性, 将有待进一步通过对比实验进行分析. 在直径为  $0.5\text{ m}$  的油盆内放置  $1\text{ L}$



1—油盆及天平; 2—顶部排烟口; 3—纵向排烟口; 4—热电偶测点; 5—热通量测点.

图 1 实验布置图  
Fig. 1 Experimental layout  
(a)—实验布置轴测; (b)—实验布置主视图.

体积分数为  $95\%$  的酒精作为燃料. 选用直径  $1\text{ mm}$ 、量程为  $-50\sim1300\text{ }^{\circ}\text{C}$  铠装  $\text{K}$  型热电偶进行火场温度监测, 热电偶的短期工作温度为  $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 长期工作温度为  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 误差一般在  $0.67\%\sim0.89\%$  之间. 在油盆中心布置了一热电偶树  $F$ , 测量油池火火焰温度的演变; 在油盆中心南侧和北侧, 间隔  $0.75\text{ m}$  和  $1.5\text{ m}$  的位置, 共布置了三束热电偶, 编号分别为  $\text{N}-1$ ,  $\text{S}-1$ ,  $\text{S}-2$ , 用于分析不同通风条件下隧道内火场温度的变化, 热电偶测点布置见图 1b. 由于酒精池火的发烟量很小, 以下未对该实验中烟气浓度和成分进行分析讨论.

首先在自然通风情况下进行池火实验, 利用电子天平测量燃料质量的实时变化, 得到自然通风条件下池火旺盛阶段酒精的质量损失速率的平均值为  $2.7\text{ g/s}$ , 见图 2. 考虑该实验过程中通风情

况良好, 取酒精的燃烧效率为  $0.97$ , 得到自然通风条件下本实验酒精池火的热释放速率  $Q_M$  为  $78.57\text{ kW}$ .

根据 Quintiere 的火灾相似准则<sup>[13]</sup>,  $Q_F = Q_M(L_F/L_M)^{5/2} = 1225\text{ kW}$ . 其中:  $Q$  为热释放速率 ( $\text{kW}$ );  $L$  为隧道的几何尺寸,  $\text{m}$ ; 下标  $F$  为隧道原型;  $M$  为隧道模型. 该模型实验相当于实际隧道中  $1225\text{ kW}$  的池火.

根据 McCaffery<sup>[6]</sup> 的经典火焰理论模型, 自然通风环境中池火火焰可以分为连续火焰区、间歇火焰区和浮力羽流区, 各不同区域火焰的高度  $z$  和火灾的热释放速率  $Q$  的计算式为

$$\frac{z}{Q^{2/5}} = \begin{cases} \leq 0.08, & \text{连续火焰区;} \\ 0.08 \sim 0.2, & \text{间歇火焰区;} \\ > 0.2, & \text{浮力羽流区.} \end{cases} \quad (1)$$

由式(1)可知, 在自然通风情况下连续火焰

区火焰高度为 0 ~ 0.46 m, 间歇火焰区火焰高度为 0.46 ~ 1.15 m, 1.15 m 以上为浮力羽流区. 因此, 将测量火焰辐射热和全热流的 Gardon 水冷式热流计两个为一组, 分别布置在油盆南侧、距油盆中心水平距离 1.5 m, 地面以上 0.25, 0.8 及 1.2 m 位置, 以测量连续火焰区、间歇火焰区、浮力羽流区三个区域火焰与周围环境的辐射热和全热流. 热流计的准确度均大于 3%. 具体的实验测量布置方案见图 1b.

采用加野四通道风速仪 KA12 对实验模型断面风速进行检测和标定, 在 0.1 ~ 4.99 m/s 速度范围内的误差为 ±0.15 m/s. 调整变频风机的频率, 分别得到纵向排烟断面平均风速 0.5, 0.8 和 1.0 m/s, 以及顶部排烟断面平均风速 0.5 m/s 四个工况. 点火后 120 s 启动机械排烟, 每次实验之后进行强制排风降温, 等待实验模型内温度降至环境温度、氧气浓度恢复至正常水平之后方可开始下次实验.

## 2 不同通风条件下酒精池火的质量损失损率

不同通风条件下火源的质量损失速率见图 2. 可知, 点火 60 s 后, 火灾进入旺盛阶段, 质量损失速率平均值约为 2.7 g/s; 120 s 开启 0.5 m/s 纵向排烟显著增强了火源质量损失速率, 最大达到了 4.5 g/s, 其他排烟工况对火源质量损失速率的影响并不显著. 火源质量损失速率的变化充分说明了 0.5 m/s 纵向排烟不利于对火灾的控制, 相反起到了一定的促进作用. 其他排烟条件下, 排烟卷吸新鲜空气对燃烧的促进作用不显著.

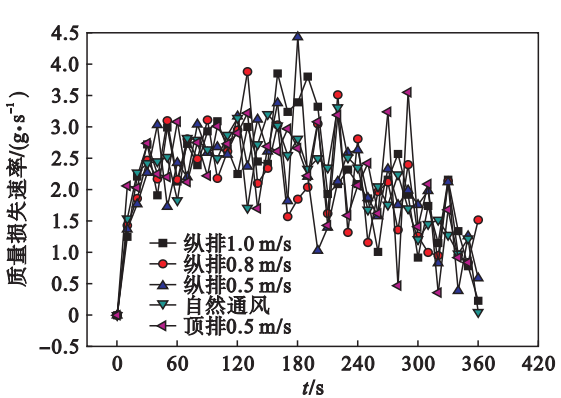


图 2 不同通风方式下火源的质量损失速率  
Fig. 2 Mass loss rate under different ventilation mode

## 3 通风对池火火焰热力学行为的影响

### 3.1 自然通风条件下不同区域火焰热流量

图 3 是自然通风情况下不同区域火焰和周围环境之间辐射热通量和对流热通量的变化曲线. 图中下、中、上分别代表连续火焰区、间歇火焰区和浮力羽流区. 由图 3a 可知, 自然通风条件下点火后 60 s 火灾进入旺盛阶段, 连续火焰区火焰辐射热通量最大, 其平均值保持在 1.0 kW/m<sup>2</sup> 左右, 连续火焰区的辐射热通量约占总热通量的 85%; 随着火焰高度的增加, 火焰辐射热通量的值显著下降, 间歇火焰区和浮力羽流区辐射热通量约占总热通量的比例分别下降为 45% 和 30% 左右. 由图 3b 可知, 间歇火焰区和浮力羽流区对流换热热量近似相等, 间歇火焰区对流换热热量波动最大, 连续火焰区对流换热热量最小, 仅为间歇火焰区和浮力羽流区火焰对流热通量的 30% 左右.

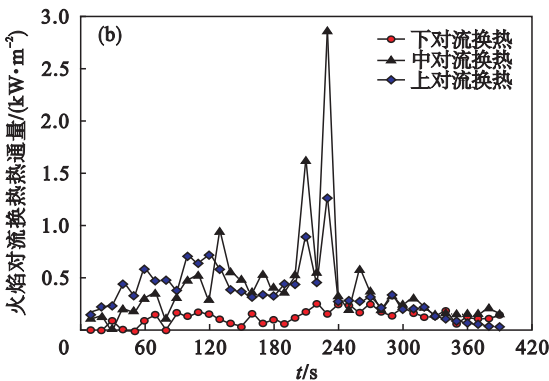
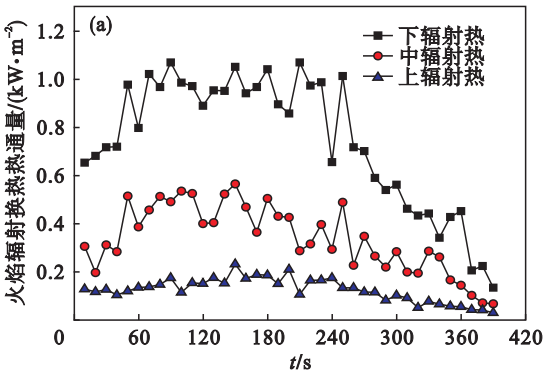


图 3 自然通风条件下不同区域火焰热通量  
Fig. 3 Heat flux in different regions of flame under natural ventilation



3.2 纵向排烟对池火火焰热流量的影响

0.5 m/s 纵向排烟条件下连续、间歇火焰区及浮力羽流区三部分火焰的热辐射通量随着时间的变化情况如图 4 所示. 通过和图 3a 的对比可知, 120 s 启动 0.5 m/s 纵向排烟条件以后, 间歇火焰区和浮力羽流区火焰的辐射热通量开始衰减, 其平均值与自然通风条件差别不大, 但连续火焰区火焰辐射热通量在 120 s 以后显著增加, 峰值最大达到了  $1.9 \text{ kW/m}^2$ , 比自然通风条件增加了 30% 左右. 说明 0.5 m/s 纵向排烟促进了火势的发展, 是应急救援中应该避免采取的排烟措施.

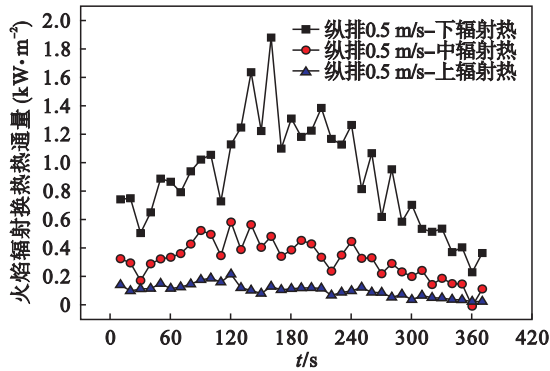


图 4 纵向排烟对火焰辐射热通量的影响  
Fig. 4 Effect of longitudinal smoke discharge on radiant heat flux of flame

由图 5 可知, 0.8 m/s 以上纵向排烟条件下连续火焰区火焰的辐射热通量的峰值显著减小, 平均值变化不大. 因此, 本实验条件下, 纵向排烟速度应保持在 0.8 m/s 以上, 以实现对火焰辐射热的有效控制, 最大程度控制火势的蔓延.

3.3 顶部排烟对池火火焰热通量的影响

图 5 是 0.5 m/s 顶部排烟情况下连续火焰区火焰辐射热通量和不同风速纵向排烟以及自然通风情况的对比. 可见 0.5 m/s 顶部排烟条件下连续火焰区辐射热通量比 0.5 m/s 纵向排烟工况减少了 50% 左右, 比自然通风条件下连续火焰区辐射热通量亦减少了 30% 左右. 这主要是由于相比自然通风方式, 0.5 m/s 顶部排烟使得对流换热占据主要地位的间歇火焰区和浮力羽流区火焰的对流换热均显著增强, 而 0.5 m/s 纵向排烟仅使得间歇火焰区火焰的对流换热增强(图 6). 0.5 m/s 顶部排烟方式下, 连续火焰区火焰辐射换热量的降低, 有利于抑制火势的蔓延和轰燃的发生, 建议在应急救援过程中优先采用顶部排烟方式.

3.4 通风方式对隧道火灾温度场的影响

图 7 是不同通风形式下火焰最高温度的对比. 可知, 相比自然通风, 120 s 开启机械排烟, 均

造成了火焰最高温度的降低, 这显然是由于排烟使得火焰与周围环境的对流热交换加强造成的(图 6). 与 0.5 m/s 纵向排烟工况相比, 0.5 m/s 顶部排烟工况下火焰最高温度略大, 但其火焰燃烧最早进入衰减阶段. 0.5 m/s 和 1 m/s 纵向排烟条件下火灾进入衰减阶段时间较晚. 0.8 m/s 纵向排烟条件下火焰温度最低, 进入衰减阶段迟于顶部排烟工况.

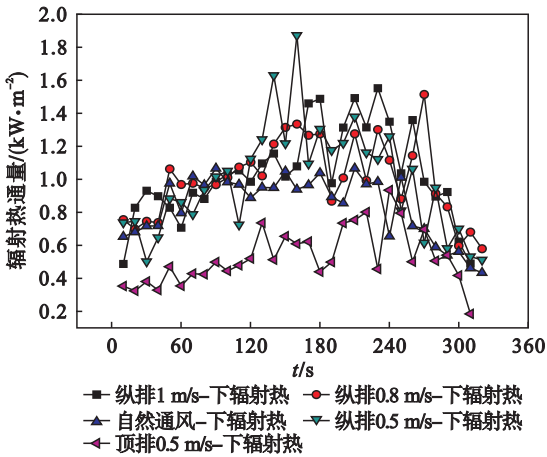


图 5 通风对连续火焰区火焰的辐射热通量的影响  
Fig. 5 Effect of ventilation on radiant heat flux of persistent flame

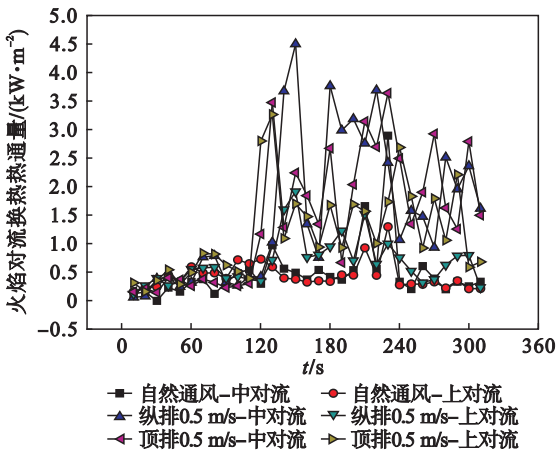


图 6 浮力羽流区和间歇火焰区的对流换热热通量  
Fig. 6 Convective heat flux of buoyancy plume and intermittent flame

油盆上方 1.5 m 隧道烟气层的平均温度如图 8 所示. 可知, 0.5 m/s 的纵向排烟的冷却效果最差; 0.5 m/s 顶排对上热烟气层的散热效果好于 0.5 m/s 纵排, 上部热烟气层温度进入旺盛阶段的时间最晚, 但较早进入衰减阶段. 纵向排烟速度的增加对上热烟气层的散热效果更显著: 1.0 m/s 的纵向排烟条件下, 上部热烟气层温度的衰减梯度最大; 0.8 m/s 纵向排烟对上热烟气层的排热效果差于 1.0 m/s 纵排.

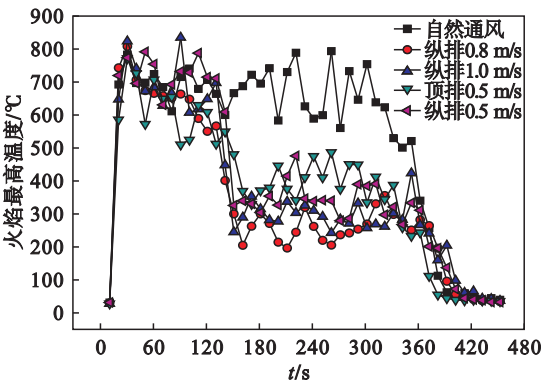


图 7 不同通风方式下火焰的最高温度  
Fig. 7 Maximum flame temperature at different ventilation

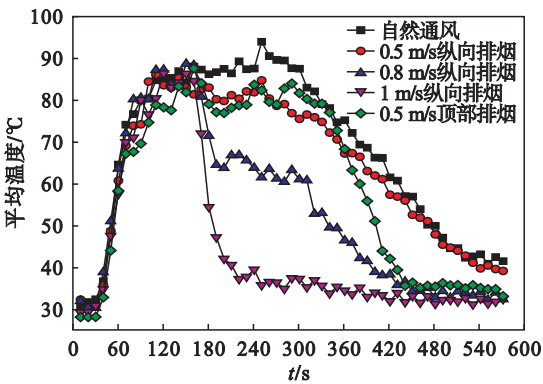


图 8 油盆上方 1.5 m 测点平均温度  
Fig. 8 Average smoke temperature at 1.5 m above oil pan

4 结 论

1) 自然通风条件下连续火焰区的辐射热通量最大,约占总热通量的 85%;间歇火焰区和浮力羽流区辐射热通量占总热通量的比例分别下降为 45% 和 25% 左右.自然通风条件下间歇火焰区对流换热热量最大.

2) 0.5 m/s 纵向排烟条件下,旺盛阶段连续火焰区火焰辐射热通量峰值最大,为 1.9 kW/m<sup>2</sup>,比自然通风条件增加了 30% 左右;下部烟气层温度的大幅度上升,对人员疏散和火势控制不利,说明 0.5 m/s 纵向排烟工况对火势发展起到了促进作用,应该避免采取该排烟模式.

3) 当纵向排烟速度继续增加至 0.8,1 m/s 时,旺盛阶段连续火焰区火焰辐射热通量的平均值波动幅度减小,峰值大大降低,而且上部热烟气层温度降低显著.本实验条件下,纵向排烟速度应保持在 0.8 m/s 以上,以实现对火焰辐射热的有效控制,最大程度控制火势的蔓延.

4) 0.5 m/s 顶部排烟对于连续火焰区火焰的辐射热通量有显著的降低作用,上部热烟气层温度进入旺盛阶段的时间最晚,且较早进入衰减阶段;下部烟气层温度峰值较小,最晚达到峰值,最早进入衰减阶段.0.5 m/s 顶部排烟是本文所讨论的隧道燃料控制型火灾中最佳的排烟形式.

参考文献:

[ 1 ] Hamins A, Yang J C, Kashiwagi T. A global model for predicting the burning rates of liquid pool fires [ R ]. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 1999.

[ 2 ] Babrauskas V. Free burning fire [ J ]. *Fire Safety Journal*, 1985, 11 ( 1 ) : 33 – 51.

[ 3 ] May H G, Mcqueen W. Radiation from large liquefied natural fires [ J ]. *Combustion Science Technology*, 1973, 7 : 51 – 66.

[ 4 ] Beyler C L. Fire hazard calculations for large open hydrocarbon fires [ M ]. Quincy: National Fire Prevention Association, 2016.

[ 5 ] Miguel M, Planas E, Ferrero F, et al. Prediction the emissive power of hydrocarbon pool fires [ J ]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 144 ( 3 ) : 725 – 729.

[ 6 ] McCaffrey B J. Purely buoyant diffusion flames: some experimental results [ R ]. Gaithersburg: National Bureau of Standards, 1979.

[ 7 ] Nasr A, Suard S, El-Rabii H, et al. Heat feedback to the fuel surface of a pool fire in an enclosure [ J ]. *Fire Safety Journal*, 2013, 60 ( 1 ) : 56 – 63.

[ 8 ] Hu L H, Hu J J, Liu S, et al. Evolution of heat feedback in medium pool fires with cross air flow and scaling of mass burning flux by a stagnant layer theory solution [ J ]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2015, 35 : 2511 – 2518.

[ 9 ] Ingason H, Ying Z L. Model scale tunnel fire tests with longitudinal ventilation [ J ]. *Fire Safety Journal*, 2010, 45 ( 3 ) : 371 – 384.

[ 10 ] Li Y Z, Lei B, Ingason H. The maximum temperature of buoyancy-driven smoke flow beneath the ceiling in tunnel fires [ J ]. *Fire Safety Journal*, 2011, 46 ( 2 ) : 204 – 210.

[ 11 ] Zhong M H, Shi C L, He L, et al. Smoke development in full-scale sloped long and large curved tunnel fires under natural ventilation [ J ]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 108 : 857 – 865.

[ 12 ] 张培红, 田向亮, 张怡, 等. 顶部排烟耦合细水雾作用下的火灾烟气特性 [ J ]. 东北大学学报 ( 自然科学版 ), 2014, 35 ( 8 ) : 1199 – 1202.

( Zhang Pei-hong, Tian Xiang-liang, Zhang Yi, et al. Coupling effect of top smoke discharging and water mist on characteristics of fire smoke [ J ]. *Journal of Northeastern University ( Natural Science )*, 2014, 35 ( 8 ) : 1199 – 1202. )

[ 13 ] Quintiere J G. Scaling applications in fire research [ J ]. *Fire Safety Journal*, 1989, 15 ( 1 ) : 3 – 29.