

文章编号: 1671-6612 (2022) 03-371-06

不同封堵方式下隧道火灾火焰自熄行为试验研究

赵战丰

(中信建设有限责任公司 北京 100027)

【摘要】 基于 Froude 相似建立了 1:10 的缩尺隧道试验台, 采用模型试验的方法, 研究了在上封堵和下封堵两种封堵方式下隧道火灾火焰的自熄行为, 分析了火源功率、封堵率、封堵距离等因素对火源自熄的影响。试验结果表明: (1) 火源自熄时间与封堵方式密切相关, 在上封堵方式下更容易熄灭; (2) 火源自熄时间随火源功率和封堵率的增大而变长, 随封堵距离的增大而变短; (3) 隧封堵方式对道顶壁下方最高烟气温度的影响较小。

【关键词】 隧道火灾; 封堵; 自熄时间

中图分类号 X932 文献标识码 A

Experimental Study on the Self-extinguishing Behavior of Tunnel Fire Flames with Different Sealing Methods

Zhao Zhanfeng

(CITIC CONSTRUCTION Co., Ltd, Beijing, 100027)

【Abstract】 Based on the Froude similarity, a 1:10 scale tunnel model was established to study the self-extinguishing behavior of tunnel fire flame by model test under two sealing modes of up sealing and down sealing. The influence of heat release rate, sealing ratio, sealing distance on the fire extinguish were also analyzed. The experiment results show that: (1) The self-distinguishing time of fire source is closely related to the sealing modes, and it is easier to extinguish under the up sealing; (2) The self-extinguishing time increases with the increases of heat release rates and sealing ratios, while decrease with the increase of sealing distances; (3) The tunnel sealing method has little effect on the maximum smoke temperature beneath the tunnel ceiling.

【Keywords】 tunnel fire; sealing; self-extinguishing time

作者(通讯作者)简介: 赵战丰(1970-), 男, 学士, 高级工程师, E-mail: zhaozf14@citic.com

收稿日期: 2022-03-28

0 引言

随着社会经济的飞速发展和城市建设的加快, 大量的隧道被建设以缓解交通压力, 隧道在方便出行的同时, 也带来了安全隐患, 其中隧道火灾是最危险的灾害之一。以2017年中国香港地铁纵火事件为例, 导致18人直接受伤^[1]。由此可见一旦发生火灾将对公共安全造成严重危害。

由于隧道特殊的狭长结构, 火灾发生后, 火焰燃烧产生的高温有毒烟气将在隧道内聚集, 将会对隧道内人员安全及隧道结构产生极大的威胁, 有数据统计表明, 火灾中约85%的受害者是死于高温有

毒烟气。隧道通风排烟系统被广泛用于控制隧道火灾烟气, 如纵向通风系统、横向通风系统和半横向通风系统。研究人员通过试验和数值模拟对隧道通风系统的各种关键问题进行了多项研究, 包括临界风速^[2-5], 最高烟气温度^[3,6], 纵向温度分布^[7,8]以及点式排烟^[1,9-11]等。

隧道通风可以有效控制火灾烟气, 但火焰仍持续燃烧直到可燃物耗尽, 持续燃烧会对隧道结构和设施造成危害。当隧道发生火灾时, 在距离隧道火源一定距离处进行封堵, 可以通过降低火焰区域的氧含量来有效扑灭隧道火焰, 降低燃烧时间从而减

少损失。例如，成宝铁路隧道因油罐车燃油泄漏而起火，最终采用封堵隧道成功扑灭火焰，但整个过程仍耗时9天，造成了巨大的经济损失^[12]。因此，有必要进一步研究隧道在封堵条件下的火焰燃烧特性及自熄特性。

已有一些关于隧道火灾封堵的文献，大多集中在封堵率对火灾行为的影响上。陈长坤在1:9的模型隧道中进行了一系列的封堵试验，研究了不同封堵率下隧道顶壁下方最高烟气温度，并提出了临界封堵率的概念^[13,14]。姚永征等人提出了一个经验模型来预测隧道入口封堵条件下的顶壁下方最高烟气温度，结果表明，最大烟气温升与无量纲火源功率存在3/4次幂关系^[15,16]。黄有波等人通过数值模拟的方法，模拟了在不同火源功率和封堵率下火灾烟气温度变化，隧道顶壁下方的最高烟气温度沿着隧道纵向方向呈指数衰减^[17]。

然而，在隧道封堵条件下，隧道火焰自熄时间、封堵距离、封堵策略等影响隧道封堵条件下火焰特性的因素的研究较少。本文开展了一系列试验，研究了隧道封堵率、火源功率、封堵距离、封堵策略对隧道内火焰自熄行为的影响。

1 模型试验

隧道内发生火灾时，隧道内的烟气流动和传热过程比较复杂，在全尺寸隧道中进行火灾试验是研究烟气流动和传热最有效的方式之一，但由于全尺寸火灾试验花费高且破坏性大，很难开展。基于Froude准则数相等的小尺寸试验被广泛应用于隧道火灾研究中。模型隧道与全尺寸隧道中火源热释放速率、烟气温度的对应关系可以分别用式（1）、（2）表示。

$$\frac{Q_m}{Q_f} = \alpha^{5/2} \tag{1}$$

$$T_m = T_f \tag{2}$$

式中： Q_m 为隧道模型中火源功率，kW； Q_f 为全尺寸隧道的火源功率，kW； α 为隧道缩尺比例； T_m 为模型隧道中的烟气温度，℃； T_f 为全尺寸隧道中的烟气温度，℃。

1.1 隧道模型

本文试验采用1:10的缩尺隧道模型，如图1所示。模型隧道长12m，宽0.5m，高0.5m，隧道下方

安装30cm高支架，隧道一侧为1cm厚钢化玻璃，便于观察试验现象，隧道的顶部、底部、侧面采用10mm厚防火板，运用石膏板作为封堵材料进行封堵。隧道火源位于隧道中心位置，烟气温度采用直径为1mm的K型热电偶，热电偶精度为 $\pm 1.5^\circ\text{C}$ ，测温范围为 $0\sim 1300^\circ\text{C}$ ，采用Agilent 34980 A采集温度数据，采样间隔为5s。在该1:10的模型隧道中，热电偶布置于隧道顶壁下方2cm处，沿隧道横向中心线纵向布置，热电偶间距10cm。

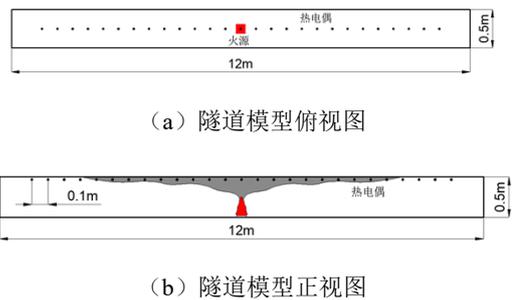


图1 隧道模型

Fig.1 Tunnel model

在试验中采用高度为2cm的正方形甲醇油池火来模拟火源，火源功率可以通过式（3）计算得到。

$$Q = \chi m_f \Delta H \tag{3}$$

式中： χ 为燃烧效率； m_f 为燃料质量损失率，g/s； ΔH 为燃烧热，kJ/g。

甲醇燃料的燃烧效率可以被认为是1，其燃烧热为19.93kJ/g，根据已有试验研究，甲醇燃料在隧道内燃烧的质量损失率平均值约为 $0.0016\text{g}/(\text{s}\cdot\text{cm}^2)$ 。试验中不同尺寸油盘的火源功率详见表1。

表1 火源功率

Table 1 Heat release rate		
油盘编号	油盘尺寸/cm×cm×cm	火源热释放率/kW
1	12.2×12.2×3	4.74
2	14×14×3	6.32
3	15.7×15.7×3	7.91
4	17.2×17.2×3	9.48

1.2 工况设计

为了研究隧道火焰在封堵情况下，火焰燃烧状态及隧道顶壁下方烟气温度变化，试验中采用50%~100%的7种封堵率和两种不同的封堵策略，本文中将封堵率定义为封堵面积占隧道横截面积的比例；封堵策略分别是从隧道底部到顶部封堵，

叫做下封堵,另一种是从隧道顶板到隧道底部封堵,称为上封堵,部分封堵工况可见图2。试验中均采用防火石膏板进行封堵。

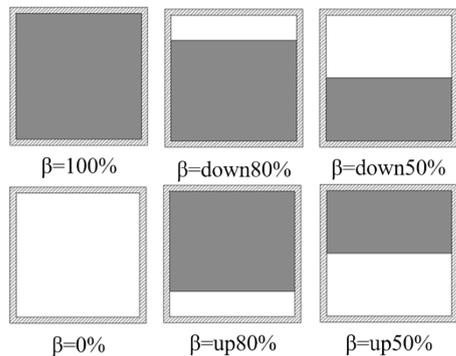


图2 封堵示意图

Fig.2 Sealing diagram

在封堵试验中,每组试验结束后由于隧道两侧入口封堵,隧道内氧气含量降低,隧道内温度升高。为了保证每组试验开始时隧道内初始环境一致,我们在每组试验结束后对隧道进行至少一小时的通风,以此来降低隧道内温度及含氧量对试验结果的影响。详细的试验列于表2。

表2 试验工况统计

Table 2 Experiment conditions

序号	火源功率/kW	封堵距离/m	封堵率
1-4		12	上封堵 50%
5-16		12/10/8	下封堵 50%
17-20		12	上封堵 60%
21-32		12/10/8	下封堵 60%
33-36		12	上封堵 70%
37-48		12/10/8	下封堵 70%
49-52	4.74/6.32/7.91/9.48	12	上封堵 80%
53-64		12/10/8	下封堵 80%
65-68		12	上封堵 90%
69-80		12/10/8	下封堵 90%
81-84		12	上封堵 95%
85-88		12	下封堵 95%
89-92		12	100%

2 试验结果及讨论

2.1 火焰特性

通过一侧的钢化玻璃可以观测到隧道内的火焰燃烧状态。火焰熄灭主要有两种情况,一种情况

是燃料耗尽;另一种情况是氧气含量极低不足以维持燃烧,该种情况被定义为火焰自熄。该系列试验中主要通过隧道内火焰熄灭后油盘内燃料是否剩余来判断是否发生自熄。试验工况中发生自熄的工况见表3。

表3 自熄工况统计

Table 3 Self-extinguish conditions

序号	火源功率/kW	封堵距离/m	封堵率	熄灭时间
64	9.48	8	down80%	27min30s
68	9.48	12	up 90%	23min25s
77	7.91	8	down90%	25min32s
78	9.48	12	down90%	26min53s
79	9.48	10	down90%	17min20s
80	9.48	8	down90%	14min26s
83	7.91	12	up95%	25min20s
84	9.48	12	up95%	16min30s
88	9.48	12	down95%	21min50s
89	4.74	12	100%	27min54s
90	6.32	12	100%	21min18s
91	7.91	12	100%	14min38s
92	9.48	12	100%	12min08s

通过表3分析可知,在本文的试验中,当隧道封堵率大于等于80%时隧道内火焰才会发生自熄。且封堵率越大、火源功率越大,火焰越容易发生自熄。主要原因是隧道封堵率越大,火焰燃烧中可提供的新鲜空气越少,供氧量越少,火焰更容易发生自熄。同一封堵率下,火源功率越大,火焰维持燃烧需要的氧气含量越高,因此火源功率越大,隧道内火焰越容易发生自熄。

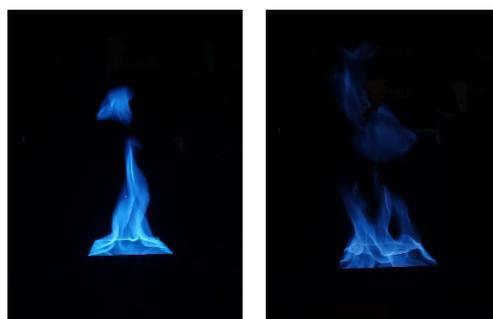


图3 试验中“鬼火”现象

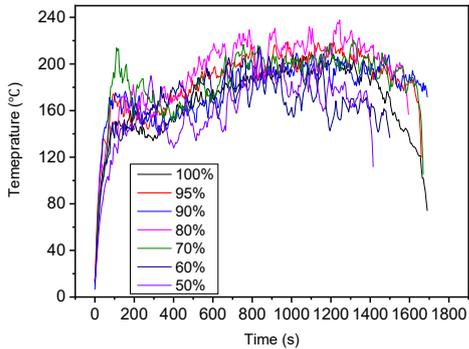
Fig.3 “Ghosting fire” in some tests

对于70%以上封堵率的工况,隧道内火焰燃烧5min之后,燃烧火焰不连续出现断层,如图3所示,该现象被认为是“鬼火”现象,与Foote等人观察

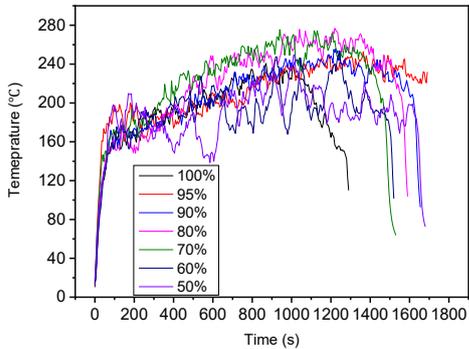
现象一致^[18]。“鬼火”现象主要是高温环境下隧道内汽化燃烧在隧道内燃烧导致的,表明隧道内火焰燃烧不充分,氧气含量低。

2.2 隧道顶壁下方烟气温度的

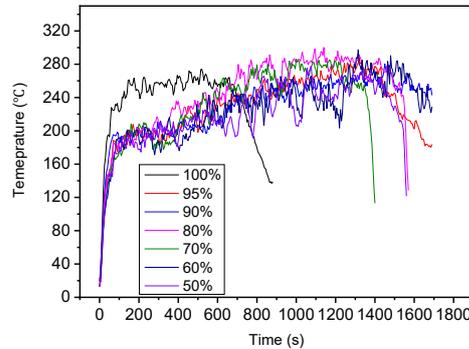
图4为不同火源功率及不同封堵率下,火源处烟气温度的变化规律。从图中可以,在封堵试验中,除100%封堵工况外,隧道顶壁下方的烟气温度随时间变化趋势基本相似。主要的差别在于,隧道封堵率越大,烟气温度的相对稳定段越短;火源功率越大,相同封堵率下烟气温度的波动越大。



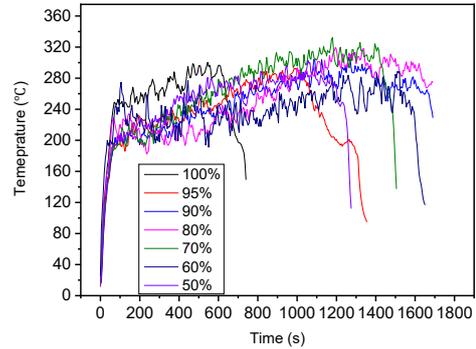
(a) 4.74kW



(b) 6.32kW



(c) 7.91kW



(d) 9.48kW

图4 不同火源功率及封堵率下烟气温度的变化

Fig.4 Smoke temperature change with time at different HRRs and sealing ratios

通过对比分析,隧道顶壁下方烟气温度的变化可分为5个阶段。以4.37kW火源功率在90%封堵率下的温度变化为例,如图5所示。第一阶段为快速发展阶段,该阶段与无封堵隧道发展状态基本相同,火焰高度和烟气温度都在快速增长。第二阶段为“准稳态”燃烧段,在此阶段隧道内火焰稳定燃烧,烟气温度也保持相对稳定状态。但在不同的火源功率及封堵工况下,该阶段的持续时间差别较大。第三阶段为二次发展阶段,在此阶段隧道顶壁下方烟气温度先降低后开始缓慢上升,同时火焰开始一定程度的摆动。第四阶段为“二次稳定段”,烟气温度在该阶段再次保持相对稳定,此阶段的持续时间随着火源功率和封堵率的不同而不同。最后阶段为熄灭阶段,火焰高度和烟气温度逐渐降低,直至火焰完全熄灭。

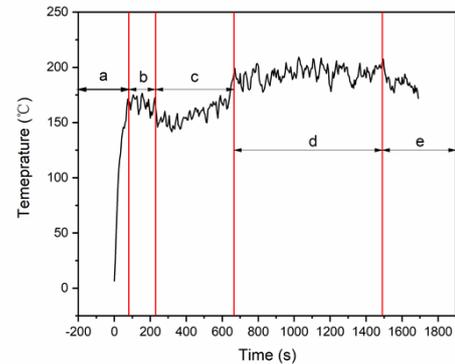


图5 4.37kW火源功率在90%下封堵工况时顶棚下方烟气温度的变化

Fig.5 The smoke temperature change with time under the tunnel ceiling of the fire source 4.37kw with the tunnel entrances 90% down sealed

理论上,隧道内氧含量是隧道封堵与开放条件下火焰特性和烟气温度变化不同的主要原因。在前两个阶段,隧道内的氧气含量相对比较充足,火焰形态变化和温度变化与开敞隧道内火焰变化相似。经前两个阶段的燃烧后,火源附近的氧气量不足以维持火源的持续稳定燃烧,火焰不断震荡且火苗不断增高以增大与氧气的接触面积。但随着隧道入口处的新鲜空气不断向火源处移动,火源附近的氧气量增加,保证火焰在一定时间的稳定燃烧。持续的燃烧导致隧道内氧气量不断减少,火焰被拉伸成细长形并开始逐渐变小,当隧道内氧气量不足以保证燃料燃烧或者油盘内燃料燃烧殆尽时,隧道内火焰熄灭。

2.3 封堵方式对隧道内火焰形态的影响

试验中采用了两种封堵方式,一种是从隧道底部到顶部的封堵,被称为下封堵;另一种是从隧道顶板到隧道底部的封堵,被称为上封堵。两种封堵方式不同,导致隧道内烟气流动形式也有不同。通过对比隧道内火焰自熄时间及顶壁下方烟气温度变化,分析隧道不同封堵策略对火灾发展特征的影响。

由表4可以看出,相对于下封堵方式,上封堵条件下,隧道内火焰更容易发生自熄,这是由于在两种工况下隧道内通风与烟气流动方式不同造成的。

表4 不同封堵策略下自熄工况统计

Table 4 Self-extinguished conditions with different sealing strategies

序号	火源功率 /kW	封堵距离 /m	封堵率	熄灭时间
68	9.48	12	up 90%	23min25s
78	9.48	12	down90%	26min53s
83	7.91	12	up95%	25min20s
84	9.48	12	up95%	16min30s
88	9.48	12	down95%	21min50s

在上封堵隧道中,火焰产生的烟气沿隧道两侧扩散。扩散至隧道两侧封堵处时,烟气无法排除隧道外而在隧道封堵处不断沉降,当沉降至封堵隧道开口处时,隧道内烟气在外界补风的作用下被吹向火源方向,一定程度上阻止了新鲜空气补充进隧道内。随着烟气的不断流动,烟气在隧道火焰附近不断积聚,氧气量减小。因此在上封堵隧道中火焰更

容易发生自熄,上封堵隧道内的气体流动方式如图6(a)所示。

而在下封堵隧道内,火灾烟气沿隧道纵向扩散至隧道两侧后,烟气可沿隧道上侧出口直接排除隧道。隧道下部的空气流动至火源位置,为火焰燃烧提供氧气,这是下封堵隧道壁上封堵隧道燃烧时间长的主要原因,下封堵隧道内的气体流动方式如图6(b)所示。

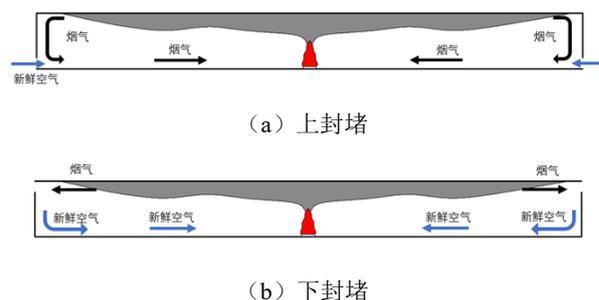


图6 隧道内气体流动示意图

Fig.6 Schematic diagram of gas flow in tunnel

2.4 封堵距离对隧道内火焰形态的影响

设置3组封堵距离试验来研究封堵距离对隧道内火焰自熄的影响。由于试验条件的限制,只对下封堵工况进行改变封堵距离对比试验分析,试验结果见表5。

在同一火源功率和同一封堵率下,封堵距离越短,隧道内的火焰就更加容易熄灭。主要原因是封堵距离越短,隧道内的氧气量就越少,同时封堵距离限制了隧道内的空气流动,火焰燃烧氧气供应量不足,火焰燃烧也就更容易熄灭。

表5 不同封堵距离下自熄工况统计

Table 5 Self-extinguished conditions with different sealing distances

序号	火源功率 /kW	封堵距离 /m	封堵率	熄灭时间
54	9.48	8	down80%	27min30s
77	7.91	8	down90%	25min32s
78	9.48	12	down90%	26min53s
79	9.48	10	down90%	17min20s
80	9.48	8	down90%	14min26s

3 结论

通过一系列的缩尺试验和理论分析,研究了不同火源功率、封堵率、封堵方式和封堵距离下封堵

隧道火焰特性, 主要结论如下:

(1) 隧道封堵率越大、火源功率越大、封堵距离越小, 火焰越容易发生自熄。

(2) 在不同的封堵率下, 隧道顶壁下方的烟气温度变化趋势相似。封堵条件下隧道内烟气温度变化经历大致五个过程, 隧道内烟气温度变化与隧道内氧气含量相关。

(3) 隧道上封堵条件下, 火焰更容易自熄, 这是隧道内烟气流动造成的, 这也意味着, 隧道火灾采用封堵灭火时, 适宜采用上封堵策略。

本文对封堵隧道的火焰行为进行试验研究, 可以为隧道火灾封堵灭火提供一定的技术支持。为了进一步为实际工程的封堵灭火提供设计依据, 尚需对隧道顶壁下方最高烟气温度、封堵灭火时间等方面进行深入研究。

参考文献:

- [1] Zhao P, Chen T, Yuan Z, et al. Critical shaft height for complete smoke exhaustion during fire at the worst longitudinal fire location in tunnels with natural ventilation[J]. Fire Safety Journal, 2020,116.
- [2] Chow W K, Wong K Y, Chung W Y. Longitudinal ventilation for smoke control in a tilted tunnel by scale modeling[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2010,25(2):122-128.
- [3] Hu L H, Chen L F, Wu L, et al. An experimental investigation and correlation on buoyant gas temperature below ceiling in a slopping tunnel fire[J]. Applied Thermal Engineering, 2013,51(1-2):246-254.
- [4] Hu L H, Huo R, Lia L Z, et al. Full-scale burning tests on studying smoke temperature and velocity along a corridor[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2005,20(3):223-229.
- [5] Li Y Z, Ingason H. Position of Maximum Ceiling Temperature in a Tunnel Fire[J]. Fire Technology, 2012,50(4):889-905.
- [6] 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(4):204-210.
- [7] 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(11):3905-3915.
- [8] Ingason H, Li Y Z. Model scale tunnel fire tests with longitudinal ventilation[J]. Fire Safety Journal, 2010,45(6-8):371-384.
- [9] Fan C G, Ji J, Wang W, et al. Effects of vertical shaft arrangement on natural ventilation performance during tunnel fires[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014,73:158-169.
- [10] Yan Z, Zhang Y, Guo Q, et al. Numerical study on the smoke control using point extraction strategy in a large cross-section tunnel in fire[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018,82:455-467.
- [11] Zhao P, Yuan Z, Yu N, et al. Effect of heat release rate and exhaust vent settings on the occurrence of plug-holing during tunnel fires with two-point extraction ventilation[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020,106.
- [12] 马海珑. 封堵战术在铁路隧道火灾扑救中的应用[J]. 科技创新导报, 2017,(26):43,45.
- [13] Chen C, Zhang Y, Lei P, et al. A study for predicting the maximum gas temperature beneath ceiling in sealing tactics against tunnel fire[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2020,98.
- [14] Chen C, Xiao H, Wang N, et al. Experimental investigation of pool fire behavior to different tunnel-end ventilation opening areas by sealing[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017,63:106-117.
- [15] Yao Y, Li Y Z, Ingason H, et al. Scale effect of mass loss rates for pool fires in an open environment and in tunnels with wind[J]. Fire Safety Journal, 2019,105:41-50.
- [16] Yao Y, Li Y Z, Lönnermark A, et al. Study of tunnel fires during construction using a model scale tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019,89:50-67.
- [17] Huang Y, Li Y, Dong B, et al. Numerical investigation on the maximum ceiling temperature and longitudinal decay in a sealing tunnel fire[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018,72:120-130.
- [18] Foote K L. 1986 LLNL enclosure fire tests data report[R]. 1987.