

文章编号: 1671-6612 (2021) 05-640-05

地下工程走廊宽高比 对烟气层温度衰减系数影响研究

毛 维 邢哲理 金晓公 李超峰 侯普民 李 娟

(军事科学院国防工程研究院 北京 100036)

【摘要】 为讨论走廊的高宽比对地下工程火灾时走廊烟气层温度衰减系数的影响, 根据相似原理搭建了地下工程典型单室一走廊结构模型实验台, 进行了不同走廊尺寸和火源规模条件下的10个工况实验, 并将模型实验结果、前人和笔者得到的理论模型预测结果进行了对比分析。结果表明, 地下工程走廊烟气层温度的衰减系数随着走廊宽高比的减小而增大, 烟气与围护结构之间的换热相对增强, 衰减系数随火源规模的变大呈衰减趋势, 火源规模越大走廊中烟气层温度衰减越小。

【关键词】 地下工程; 宽高比; 烟气层温度; 衰减系数

中图分类号 TU834 文献标识码 A

Study on the Influence of Corridor Aspect Ratio on Attenuation Coefficient of Smoke Layer Temperature in Underground Engineering

Mao Wei Xing Zheli Jin Xiaogong Li Chaofeng Hou Pumin Li Juan

(Defense Engineering Institute, Academy of Military Science PLA, Beijing, 100036)

【Abstract】 In order to discuss the influence of corridor aspect ratio on attenuation coefficient of smoke layer temperature in Underground engineering, according to the similarity principle, a Underground engineering typical room-corridor structure model test-bench was built. Experiments were carried out under 10 working conditions with different corridor sizes and fire source sizes, the model experimental results and the theoretical model prediction results obtained by predecessors and the author are compared and analyzed. The results show that the attenuation coefficient of smoke layer temperature increases with the decrease of corridor aspect ratio, the heat transfer between the smoke and the enclosure is enhanced, the attenuation coefficient decreases with the increase of fire source, the larger the fire source, the smaller the attenuation coefficient of smoke layer temperature in the corridor.

【Keywords】 Underground engineering; aspect ratio; smoke layer temperature; attenuation coefficient

0 引言

火灾烟气热特性一直是火灾研究的焦点, 高温烟气不仅可以直接对人员产生热灼伤^[1,2], 还会严重影响建筑结构强度^[3], 建筑内温感报警器和自动喷水灭火系统由顶棚附近的热烟气触发, 烟气层温度的衰减程度是影响人员疏散的重要因素。地下工程处于地下, 空间相对封闭并且与外界连通受限,

火灾时烟气热特性与地面建筑存在差异, 人员疏散逃生和消防救援的复杂性及危险性远大于地面建筑^[4]。

单室一走廊是地下工程的典型结构, 单室和走廊是构成地下工程的基本元素, 工程内单室发生火灾时, 人员通过走廊向外逃生。前人针对单室^[5,6]和巷道(隧道)^[7-9]内的温度预测模型进行了很多

作者简介: 毛 维 (1980.11-), 男, 硕士, 高级工程师, E-mail: morewell@sina.com

通讯作者: 邢哲理 (1986.9-), 男, 博士, 工程师, E-mail: zheli86@sina.com

收稿日期: 2021-03-01

研究, 针对地下工程典型单室一走廊结构的烟气热特性研究相对较少。因此, 本文基于相似原理搭建了地下工程一个防火分区的单室一走廊结构模型实验台, 构建了数据采集系统, 通过改变火源规模和走廊尺寸进行了 10 个工况的火灾模型实验, 将模型实验结果和前人理论模型预测结果进行了对比分析, 以期得到地下工程火灾时走廊宽高比对烟气层温度衰减系数的影响。

1 理论模型

一般情况下, 地下工程的单室内发生火灾时, 烟气会通过门流入走廊, 在走廊进行扩散, 扩散过程中热烟气与冷空气相互卷吸, 热烟气通过对流和辐射与围护结构进行换热, 因此烟气温度在扩散过程中会逐渐衰减。胡隆华^[10]基于双区域理论、连续性方程及能量方程推导得到了火灾烟气温度在隧道长度方向的衰减模型, 如式 (1) 所示, 其中烟气层温度衰减系数为 $k = h_{vd}(2\dot{h} + W)/c_p\dot{m}$ 。

$$\frac{\Delta T}{\Delta T_0} = \exp\left\{-\frac{h_{vd}(2\dot{h} + W)}{c_p\dot{m}}(x - x_0)\right\} \quad (1)$$

Li 等人^[11]基于质量和能量守恒推导得到了隧道内烟气温度在长度方向简化的一维衰减模型, 如式 (2) 所示, 其中烟气层温度衰减系数为 $k = St(\frac{2H}{W} + 20.3\frac{W}{H})$, 简化的模型可以快捷的预测烟气温度, 其在推导过程中忽略了热烟气对冷空气的卷吸作用。

$$\frac{\Delta T}{\Delta T_0} = \exp\left\{-St\left(\frac{2H}{W} + 20.3\frac{W}{H}\right)\frac{(x - x_0)}{H}\right\} \quad (2)$$

笔者^[12]基于双区域模型、连续性方程以及能量方程, 针对地下工程单室火灾时长走廊中的烟气层温度衰减模型进行理论推导, 得到一种走廊内烟气层温度预测模型, 如式 (3) 所示, 其中烟气层温度衰减系数为 $k = h_{vd}S_0H/c_p\dot{m}_0$ 。

$$\frac{\Delta T}{\Delta T_0} = \exp\left(-\frac{h_{vd}S_0H}{c_p\dot{m}_0}\frac{x}{H}\right) \quad (3)$$

式 (1) ~ (3) 中, H 为走廊高度, m; W 为走廊宽度, m; x 为距离, m; \dot{h} 为烟气层厚度, m; h_{vd} 为有效换热系数, c_p 为定压比热, kJ/(kg·K); \dot{m}

为烟气流量, kg/s; ΔT 为烟气层温度与冷空气温度差, K; 下角标 0 表示物理量的初始值。

2 实验

2.1 实验台搭建

本文以某地下工程的一个防火分区为研究对象, 该对象为单室-走廊结构, 火源位于单室内, 火灾发生后烟气由单室蔓延至走廊, 通过走廊扩散至口部。考虑到全尺寸实验的危险性和难以重复性, 本文根据相似理论和关键相似准则^[13]通过搭建模型与实体为 1:4 的模型进行实验研究。模型实验台火源单室的尺寸为 1.2m×0.75m×0.6m, 单室门尺寸 0.75m×0.2m, 走廊长为 15 m, 走廊宽度和高度尺寸根据不同工况设置。实验模型主要采用塑钢材料, 通过模块化连接可以改变模型走廊的宽度和高度尺寸, 火源房间主要采用耐高温钢化玻璃, 各模块采用防火密封剂进行封堵密封。基于模型率分析得到模型与实体之间的温度关系为 1:1, 热值比例为 1:64, 火源功率比例为 1:32, 时间比例为 1:2。

2.2 工况设置

模型实验综合考虑到不同火源规模和不同走廊尺寸的工况, 采用三种不同直径的圆形油池火作为火源 (燃料为正庚烷), 并结合走廊宽度和高度的变化共进行了 10 个工况的模型实验, 如表 1 所示。

表 1 实验工况

| 工况 | 油盘直径 /cm | 燃料体积 /mL | 走廊高度 /cm | 走廊宽度 /cm | 无量纲高宽比 |
|----|----------|----------|----------|----------|--------|
| 1 | 10 | 100 | 75 | 50 | 1.5 |
| 2 | 14.1 | 200 | 75 | 50 | 1.5 |
| 3 | 20 | 300 | 75 | 50 | 1.5 |
| 4 | 10 | 100 | 75 | 40 | 1.875 |
| 5 | 14.1 | 200 | 75 | 40 | 1.875 |
| 6 | 10 | 100 | 75 | 60 | 1.25 |
| 7 | 14.1 | 200 | 75 | 60 | 1.25 |
| 8 | 10 | 100 | 60 | 50 | 1.2 |
| 9 | 14.1 | 200 | 60 | 50 | 1.2 |
| 10 | 20 | 300 | 60 | 50 | 1.2 |

2.3 实验台测点布置

实验台中共设置了 8 组热电偶树 (T1~T8), 如图 1 所示。单室中 (T1~T3) 每组热电偶树竖直

方向上有8个热电偶探头,从下到上依次为1#~8#探头,相邻的两个探头相距8cm,1#探头与地面、8#探头与屋顶距离都为2cm;工况1~7时走廊中(T4~T8)每组热电偶树有6个热电偶探头,与顶棚之间距离由上至下分别为1、15、29、43、57、71cm,工况8~工况10时走廊中每组热电偶树有5个探头,与顶棚之间距离由上至下分别为1、15、29、43、57cm。实验过程中温度数据采集系统将各测点处温度实时显示和存储在电脑上,数据采集间隔为5s。

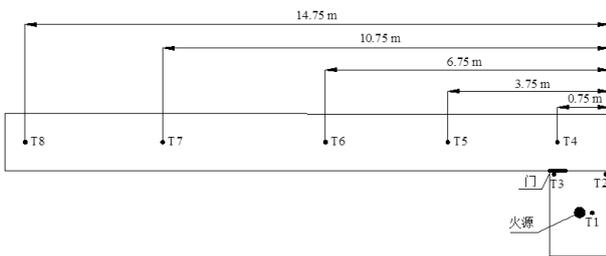


图1 模型实验测点布置图

Fig.1 Layout of measuring points in model experiment

2.4 实验过程

为保证安全顺利地展开模型实验,主要分三个阶段进行:

(1) 实验准备阶段: 检查实验台是否完好; 检查实验数据采集系统是否正常; 检查其他仪器和辅助设备是否正常工作。这一阶段工作的目的是确保客观条件能够保证实验正常进行。

(2) 实验进行阶段: 记录环境温度、实验时间以及实验工况等数据; 开启实验数据采集系统、点火并记录实验数据; 实验结束后停止采集数据, 通过通风排烟将实验台冷却恢复至环境条件。

(3) 实验后工作阶段: 查看燃料是否燃尽; 保存实验数据。

3 结果与讨论

3.1 烟气层温度随距离的变化规律

从前人的研究来看,烟气层温度随着与火源距离的增大,呈指数衰减规律,对于模型实验结果与前人研究得到的规律是否具有 consistency 需要将模型实验结果进行计算分析。考虑将不同火源规模条件下的模型实验结果进行分类对比分析,图2~4分别为油池直径10cm(工况1、4、6、8)、油池直径14.1cm(工况2、5、7、9)和油池直径20cm(工

况3、10)时模型实验烟气层温度随距离的变化规律。从图2~4中可以看出,笔者将10个工况条件下得到的烟气层温度均随无量纲距离变化进行了拟合,图中的曲线为拟合曲线,观察发现实验得到的结果与前人得到的理论模型具有规律一致性,均呈指数衰减规律。通过对实验结果的曲线拟合可以得到实验结果的烟气层温度衰减系数,进而可以与理论结果进行对比分析,研究无量纲宽高对衰减系数的影响及相关理论模型对于地下工程火灾的适用性。

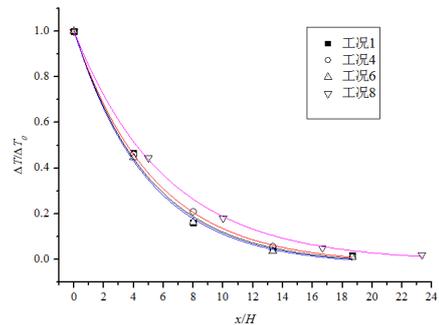


图2 油池直径为0.1m时烟气层温度衰减规律

Fig.2 The smoke temperature attenuation law when diameter is 0.1m

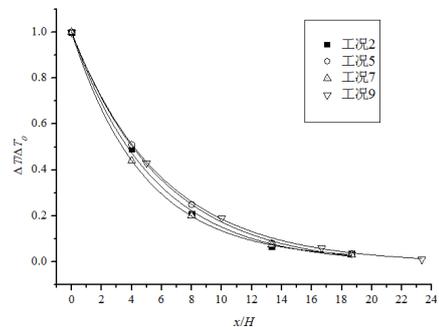


图3 油池直径为0.14m时烟气层温度衰减规律

Fig.3 The smoke temperature attenuation law when diameter is 0.14m

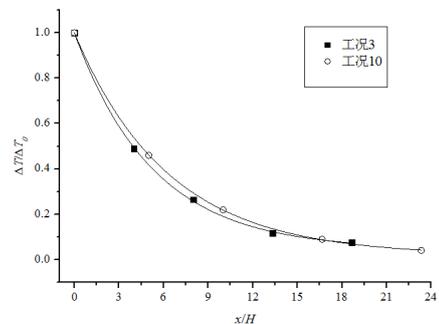


图4 油池直径为0.2m时烟气层温度衰减规律

Fig.4 The smoke temperature attenuation law when diameter is 0.2m

3.2 衰减系数预测值与实验值对比

为了便于对比分析衰减系数预测值与实验值, 定义 γ 为模型实验得到的温度衰减系数和预测模型的衰减系数之间的相对误差, γ 可表示为:

$$\gamma = |k_m - k| / k_m$$
 其中 k_m 为模型实验结果拟合得到的衰减系数, m^{-1} 。模型实验得到的温度纵向衰减

系数和预测模型衰减系数以及它们之间的相对误差如表 2 所示。从表中可以发现, 式 (1) 和式 (3) 得到的衰减系数与模型实验得到的衰减系数之间的误差在 10% 以内, 式 (2) 在高宽比为 1.2 时预测效果良好。通过表中数据对比还可发现衰减系数随火源规模的增大呈减小趋势, 即火源规模越大, 走廊中烟气层温度衰减越小。

表 2 模型实验和预测模型衰减系数及相对误差

Table 2 Attenuation coefficient and relative error of model experiment and prediction model

| | 工况 1 | 工况 2 | 工况 3 | 工况 4 | 工况 5 | 工况 6 | 工况 7 | 工况 8 | 工况 9 | 工况 10 |
|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 模型实验 | 0.279 | 0.251 | 0.228 | 0.268 | 0.235 | 0.29 | 0.253 | 0.292 | 0.262 | 0.25 |
| 式 (1) / m^{-1} | 0.284 | 0.260 | 0.250 | 0.264 | 0.240 | 0.293 | 0.272 | 0.295 | 0.282 | 0.27 |
| 误差/% | 1.8 | 3.6 | 9.6 | 1.5 | 2.1 | 1.0 | 7.5 | 1.0 | 7.6 | 8.0 |
| 式 (2) / m^{-1} | 0.165 | 0.165 | 0.165 | 0.146 | 0.146 | 0.184 | 0.184 | 0.238 | 0.238 | 0.238 |
| 误差/% | 40.9 | 34.3 | 27.6 | 45.5 | 37.9 | 36.6 | 27.3 | 18.5 | 9.2 | 4.8 |
| 式 (3) / m^{-1} | 0.269 | 0.246 | 0.242 | 0.255 | 0.231 | 0.282 | 0.262 | 0.285 | 0.272 | 0.264 |
| 误差/% | 3.6 | 2.0 | 6.1 | 4.9 | 1.7 | 2.8 | 3.6 | 2.4 | 3.8 | 5.6 |

3.3 走廊宽高比对烟气层温度衰减系数影响

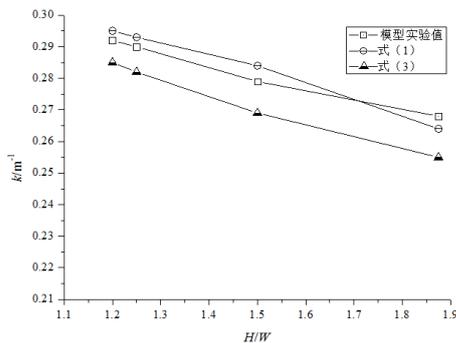


图 5 油池直径为 0.1m 时衰减系数变化
 Fig.5 The attenuation coefficient changes when diameter is 0.1m

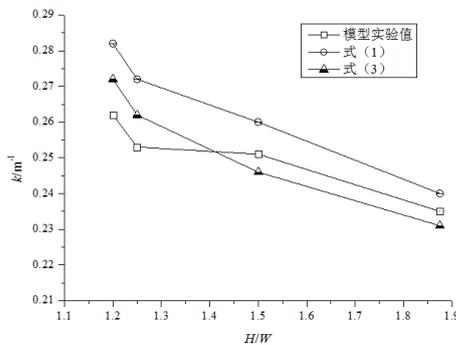


图 6 油池直径为 0.14m 时衰减系数变化
 Fig.6 The attenuation coefficient changes when diameter is 0.14m

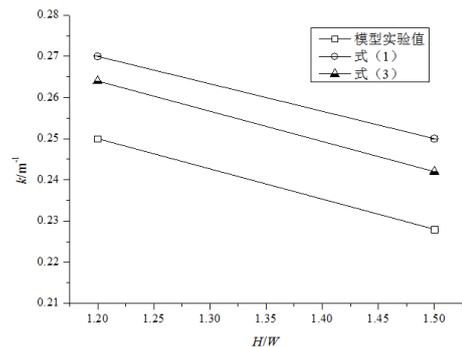


图 7 油池直径为 0.2m 时衰减系数随走廊宽高比变化
 Fig.7 The attenuation coefficient changes when diameter is 0.2m

定义走廊中无量纲宽高比为 $H^*=H/W$ 。图 5~图 7 所示为不同火源规模条件下 (油池直径: 0.1m, 0.141m, 0.2m), 衰减系数随走廊无量纲宽高比的变化。从图中可以发现, 在同一火源规模条件下, 烟气层温度的衰减系数随走廊无量纲宽高比的减小而增大, 这说明无量纲宽高比减小使得热烟气向围护结构的散热量相对增加, 卷吸作用导致的热损失就相对减少, 这个结果与 Lee 等人^[14]得到的结论类似。由于式 (2) 忽略了卷吸作用, 因此它与模型实验和另两个预测模型之间差值可以一定程度上反映卷吸作用导致的烟气热损失情况。从表 2 中可以发现, 式 (2) 的预测结果与另两个模型及模型实验结果之间的差别随着高宽比的增大而减小,

这亦证明了上述结果。因此,可以推断,当走廊的高宽比小到一定值以后, Li 等人得到的预测模型也可以较好地预测实验结果。实际上在工况 9 和 10 时,走廊的高宽比为 1.2,式(2)与模型实验之间衰减系数的相对误差在 10%以内,预测结果与实验结果基本一致。

4 结论

基于以上模型实验结果和理论模型预测结果的分析,可以得到地下工程走廊烟气层温度的衰减系数随着走廊高宽比的减小而增大,烟气与围护结构之间的换热相对增强,烟气与空气之间的卷吸换热作用相对减弱,衰减系数随火源规模的变大呈衰减趋势,火源规模越大走廊中烟气层温度衰减越小。

参考文献:

- [1] 黄锐,杨立中,方伟峰,等.火灾烟气危害性研究及其进展[J].中国工程科学,2002,4(7):80-85.
- [2] 杨立中,方伟峰.火灾中的烟气毒性研究[J].火灾科学,2001,10(1):29-33.
- [3] 李忠友,刘元雪,刘树林,等.火灾作用下隧道衬砌结构变形理论分析模型[J].岩土力学,2012,33(2):307-310.
- [4] 张吉光.高层建筑和地下建筑通风与防排烟[M].北京:中国建筑工业出版社,2005.
- [5] McCaffrey B J, Quintiere J G, Harkleroad M F. Estimating room temperatures and the like hood of flashover using fire test data correlations[J]. Fire Technology, 1981,18(1):98-119.
- [6] 茅靳丰,邢哲理,黄玉良,等.防护工程密闭空间火灾热分配试验研究[J].中国安全科学学报,2014,24(5):44-50.
- [7] 郭辉.集中防烟模式下特长铁路隧道救援站火灾烟气控制数值模拟分析[J].制冷与空调,2015,(1):87-93.
- [8] 王松,王子云,梁园,等.基于 FDS 的公路隧道火灾温度分布和烟气回流分析[J].制冷与空调,2015,(5):601-605.
- [9] 付召,王子云.隧道火灾羽流质量流量计算公式的研究[J].制冷与空调,2018,(3):231-234.
- [10] 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.
- [11] Li L, Cheng X, Wang X, et al. Temperature distribution of fire-induced flow along tunnels under natural ventilation[J]. Journal of Fire Sciences, 2012,30(2):122-137.
- [12] 茅靳丰,邢哲理,李超峰,等.一种长通道火灾烟气温度预测模型[J].工程热物理学报,2016,37(10):2230-2237.
- [13] 姚亦君.城市隧道自然通风模型实验研究[D].南京:解放军理工大学,2008.
- [14] Lee S R, Ryou H S. An experimental study of the effect of the aspect ratio on the critical velocity in longitudinal ventilation tunnel fires[J]. Journal of Fire Sciences, 2005,23:119-138.