

文章编号: 1671-6612 (2019) 06-669-05

# 防护工程非火源房间火灾烟气特性研究

邢哲理<sup>1</sup> 邓非凡<sup>1</sup> 龙洋波<sup>1</sup> 吉少杰<sup>2</sup> 房电伟<sup>1</sup> 白 韧<sup>1</sup>

(1. 军事科学院国防工程研究院 北京 100036;

2. 中央军委机关事务管理总局 北京 100120)

**【摘要】** 为讨论防护工程火灾时非火源房间内烟气特性, 根据相似原理搭建了模型与实体比例为 1:4 的单室-走廊-单室模型实验台, 进行了 2 个工况的模型实验, 对比研究分析了烟气扩散室内和门口走廊中烟气温度、CO 浓度、CO<sub>2</sub> 浓度及 O<sub>2</sub> 浓度等烟气特性。结果表明, 火灾发展阶段, 扩散室内的烟气温度比门外走廊处低, 烟气中 CO、CO<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub> 对人体的危害性比走廊处小, 烟气温度和浓度变化滞后于走廊; 火灾充分发展阶段烟气扩散室中烟气温度和浓度与走廊中几乎相同。火灾时, 远火源端单室中烟气危害更大。

**【关键词】** 火灾; 防护工程; 非火源房间; 烟气

中图分类号 X936 文献标识码 A

## Study on Fire Smoke Characteristics of Non-fire Source Room in Protective Engineering

Xing Zheli<sup>1</sup> Deng Feifan<sup>1</sup> Long Yangbo<sup>1</sup> Ji Shaojie<sup>2</sup> Fang Dianwei<sup>1</sup> Bai Ren<sup>1</sup>

(1. Defense Engineering Institute of PLA Academy of Military Sciences, Beijing, 100036;

2. General Administration of Organs Affairs of the Central Military Commission, Beijing, 100120)

**【Abstract】** In order to discuss smoke characteristics of Non-fire source room when fire happened in Protective Engineering, a room-corridor-room model test-bench with a ratio of 1:4 between model and entity was built according to the similarity principle, and model experiments were carried out under two working conditions. The smoke temperature, CO concentration, CO<sub>2</sub> concentration and O<sub>2</sub> concentration in smoke diffusion room and doorway corridor were compared and analyzed. The results show that in the stage of fire development, the smoke temperature in the diffusion room is lower than that in the corridor outside the door, the harmfulness of CO, CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> in the diffusion room to human body is less than that in the corridor, and the change of smoke temperature and concentration lags behind that in the corridor; in the stage of full development of fire, the smoke temperature and concentration in the diffusion room are almost the same as that in the corridor. In the case of fire, the smoke hazard in the diffusion room at the far fire source is greater.

**【Keywords】** fire; Protective Engineering; Non-fire source room; smoke

## 0 引言

火灾烟气是指火灾时产生的气体和悬浮在其中的烟粒子的总称, 是人员伤亡的主要原因<sup>[1,2]</sup>, 烟气的高温不仅会对人员安全造成威胁, 还对设施设备、工程建筑结构造成巨大损坏<sup>[3,4]</sup>。因此, 不少学者针

对防护工程、隧道等地下工程进行了研究<sup>[5-8]</sup>。

由于火灾的破坏性, 模型实验成为研究火灾的重要手段<sup>[9]</sup>, “单室-走廊”结构是防护工程中非常典型的结构样式, 美国弗吉尼亚大学的研究组搭建了“房间-走廊”结构的模型实验台, 研究了通风

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

通讯作者: 邓非凡 (1987.7-), 男, 博士, 工程师, E-mail: dengfeifanstudy@sina.com

收稿日期: 2019-03-05

受限情况下的烟气迁移规律研究<sup>[10,11]</sup>，国内火灾研究人员也搭建并改进了小尺度模型实验台进行了相关的研究<sup>[12,13]</sup>。前人的研究主要集中于火灾烟气在走廊中的分布特性，本文根据相似原理搭建“火源单室-走廊-扩散单室”模型实验台和数据采集系统，研究火源单室内发生火灾时，烟气通过走廊进入扩散单室后，扩散单室内和走廊处烟气特性，为防护工程火灾人员逃生及消防救援工作提供参考。

### 1 实验

#### 1.1 实验台搭建

实验选择一个防护工程的防火分区为原型，该原型由一个火源房间、长通道和一个烟气扩散房间组成。本文根据传热学相似理论和关键相似准则<sup>[9]</sup>以1:4的几何比例建立模型，依据模型率分析可得到模型与实体之间的温度、烟气浓度关系均为1:1，时间比例为1:2，热释放速率比例为1:32，火源热值比例为1:64。模型实验台走廊尺寸为15m×0.5m×0.75m，火源房间尺寸为1.2m×0.75m×0.6m，房间开一个高0.75m、宽0.2m的门，没有窗户，烟气扩散房间尺寸与火源房间相同。模型主体采用塑钢材料，模块化连接，可变换模型的宽度和高度，火源房间选用耐高温钢化玻璃材质，以便于观察火焰，火源房间顶部采用厚铁皮，模块之间连接处采用防火密封胶封堵以保证完全密封。搭建的实验台如图1所示。



图1 模型实验台示意图

Fig.1 Schematic diagram of model test bench

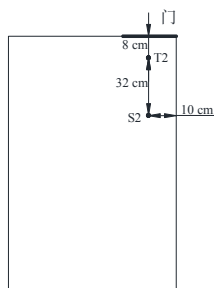


图2 烟气扩散室内测点布置图

Fig.2 Layout of measuring points in smoke diffusion room

#### 1.2 火源及工况设置

工况1和工况2均采用直径14.1cm的油池盛放200mL正庚烷燃料作为火源，火源位于火源单室中央，其中工况1时烟气扩散室门口距走廊火源端6.62m，工况2时为12.72m，走廊远火源端封闭。

#### 1.3 数据采集系统

火灾模型实验数据采集系统主要包括烟气成分浓度采集系统、火源质量损失速率采集系统以及温度采集系统，本文分析只涉及温度采集系统和烟气成分浓度采集系统。温度测量采用直径0.5mm的K型热电偶制作热电偶树探测不同高度温度值，热电偶测量范围为0~1300℃，测量精度为0.4%，响应时间为10s。经过温度采集模块R-8018BL处理后通过RS-485通信总线将数据显示在采集软件上，数据采集软件由VIASUAL BAISC编写，能够实时的采集、观察和储存各测点处的温度情况。

通过TESTO 310烟气分析仪进行一氧化碳、二氧化碳及氧气浓度三个物理量的同时测量，氧气的测量精度为0.2%，响应时间为30s，CO和CO<sub>2</sub>的响应时间为60s，CO的测量精度为20ppm（0-400ppm），5%（401-2000ppm），10%（2001-4000ppm）。

#### 1.4 测点布置

在烟气扩散单室内设置一个烟气测点S2和一组热电偶树T2，平面布置如图2所示。在走廊中烟气扩散室门口处设置烟气测点S1和一组热电偶树T1，工况1时，S1和T1距火源单室6.62m，工况2时时S1和T1距火源单室12.72m。烟气扩散单室内T2处热电偶树由下至上为1#~8#热电偶探头，8#热电偶和1#热电偶分别距单室顶棚和地面2cm，相邻的两个热电偶之间的距离为8cm。走廊中T1处的热电偶树上包含6个探头，从下往上分别是1#~6#测点，其中6#测点与走廊顶棚距离为1cm，1#热电偶与地面距离为4cm，每相邻的两个探头之间相距14cm。

### 2 结果与讨论

#### 2.1 温度特性分析

观察图3发现，工况1时，烟气扩散室外的走廊处温度与扩散室内温度差别较大，走廊中T1处5#和6#探头的最高温度别达到了55℃和90℃，烟气扩散室内最大值为41℃，这是由于工况1时

烟气扩散室位于走廊中部, 烟气还没有大量沉降至门上沿高度以下。

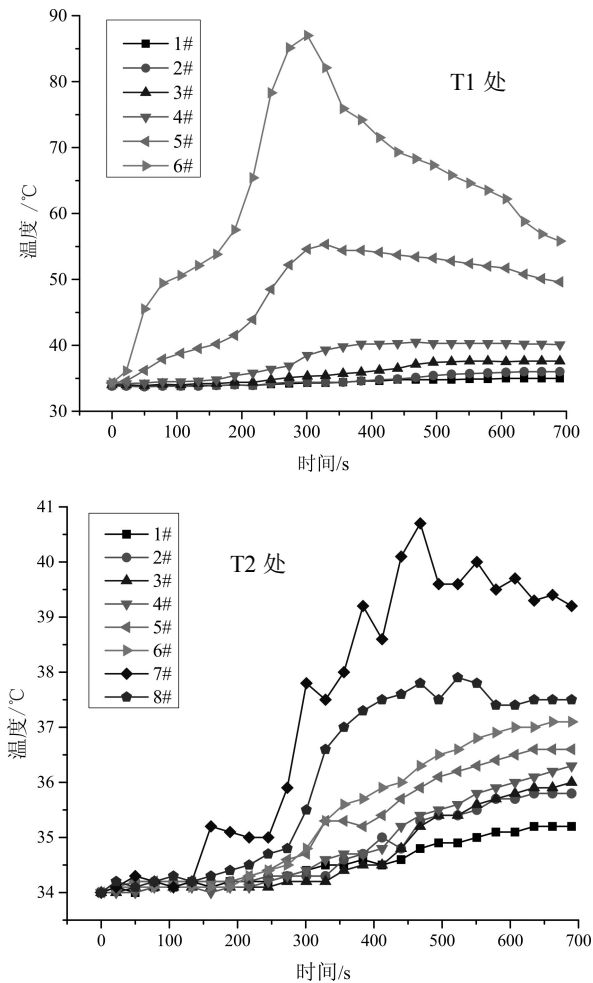


图 3 工况 1 时温度随时间变化

Fig.3 Temperature changes with time under case 1

观察图 4 可以发现, 工况 2 时, 门口外的走廊中 T1 处最高温度将近 46℃, 扩散室内 T2 处最高温度将近 43℃, 这是由于烟气扩散至走廊末端时温度衰减幅度较大, 烟气的沉降比较明显, 导致进入扩散室内烟气的温度与走廊中温度差别不大。并且由于烟气的沉降, 走廊和扩散室内的烟气基本完全混合, 不存在典型的烟气和冷空气的双区域分层现象。以上说明, 对于距火源较远的非火源房间, 由于房间和走廊中温度差别不大, 并且烟气扩散室内烟气分层条件恶劣, 人员在其中避难有可能会加速人员的伤亡。因此, 火灾发生后人员应避免在距离火源较远的房间内停留避险, 尽快找就近的出口疏散。

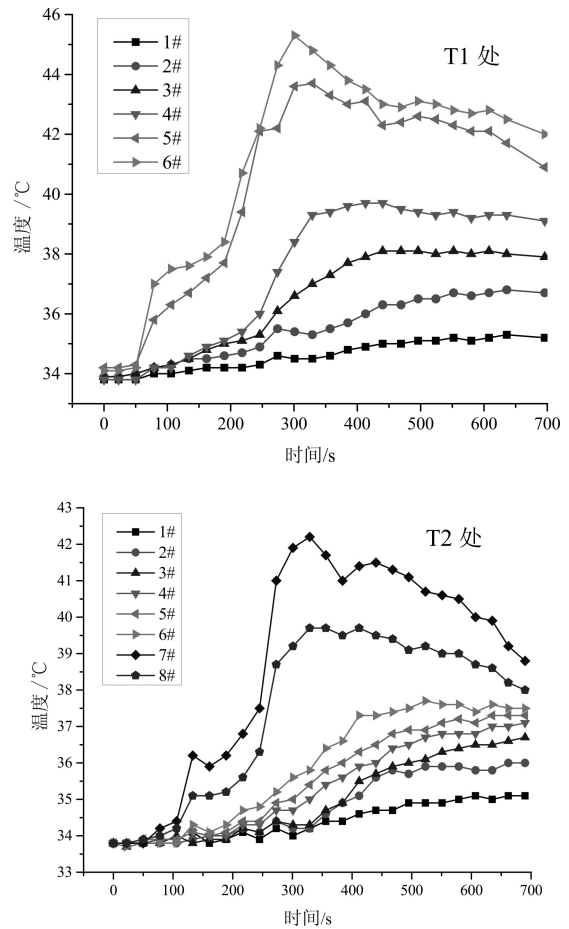


图 4 工况 2 时温度随时间变化

Fig.4 Temperature changes with time under case 2

### 2.2 烟气浓度分析

一般情况下, 当氧气浓度为 10%~17% 时人员会感觉疲惫、活动能力下降, 设人员火灾逃生中氧气的浓度危险值为 17%; 当一氧化碳浓度为 600ppm~700ppm 时人员会感觉头疼、呼吸不畅, 设人员火灾逃生中一氧化碳浓度危险值为 600ppm; 二氧化碳浓度为 2% 时人员会呼吸困难和头晕, 设人员火灾逃生中二氧化碳浓度危险值为 2%。

图 5 和图 6 所示为工况 1 和工况 2 时走廊中 S1 处和烟气扩散室中 S2 处的 CO 浓度随时间变化。观察发现, 走廊中 CO 浓度总体上大于单室内, 火灾发展阶段走廊中 CO 浓度远大于单室内, 火灾进入充分发展阶段后单室和走廊中的 CO 浓度几乎相同。工况 1 时, 走廊中 S1 处 CO 浓度在 320s 达到危险值, 扩散室内 S2 为 380s; 工况 2 时, S1 处 CO 浓度在 250s 达到危险值, 扩散室内 S2 处为

310s, 并且由于烟气沉降作用, 走廊远端的 CO 浓度值远大于近火源端。以上说明在走廊远火源端 CO 浓度更早达到危险值, 扩散室内 CO 浓度达到危险值的时间只比走廊中慢了约 1 分钟, 且扩散室内 CO 浓度在火灾后期与走廊中几乎相同, 在烟气扩散室内不能有效躲避一氧化碳气体。

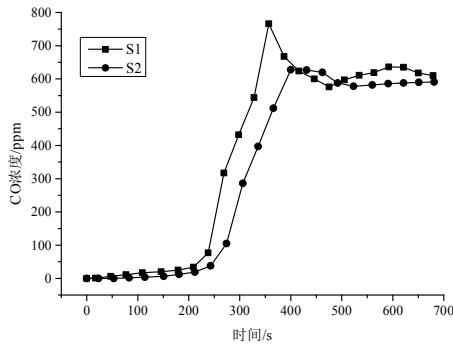


图 5 工况 1 时 CO 浓度变化

Fig.5 Comparison of CO concentration under case 1

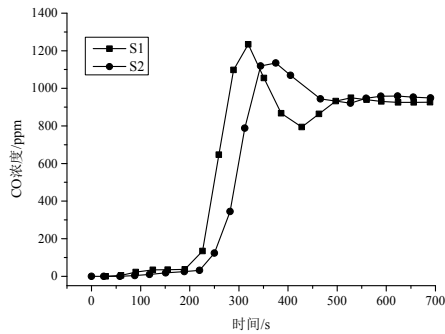


图 6 工况 2 时 CO 浓度变化

Fig.6 Comparison of CO concentration under case 2

图 7 和图 8 所示为工况 1 和工况 2 时 S1、S2 处的 CO<sub>2</sub> 浓度随时间变化。对比发现, 无论扩散单室在走廊中部还是远火源端, CO<sub>2</sub> 浓度的最大值差别不大, CO<sub>2</sub> 浓度随时间变化与 CO 类似。

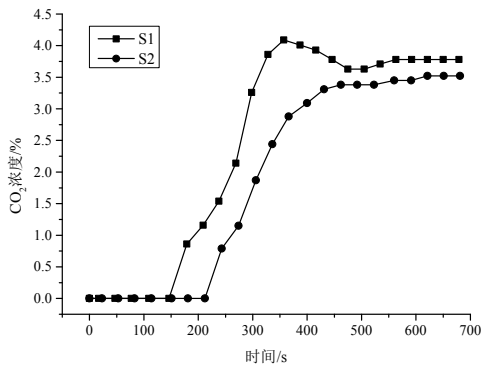


图 7 工况 1 时 CO<sub>2</sub> 浓度变化

Fig.7 Comparison of CO<sub>2</sub> concentration under case 1

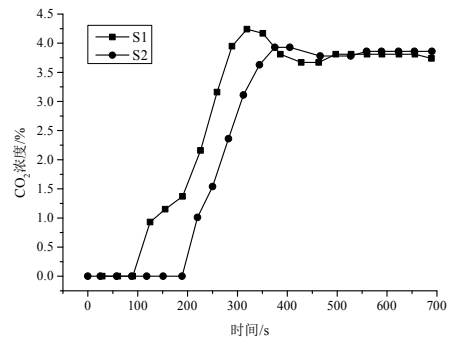


图 8 工况 2 时 CO<sub>2</sub> 浓度变化

Fig.8 Comparison of CO<sub>2</sub> concentration under case 2

图 9 和图 10 所示为工况 1 和工况 2 时 S1 和 S2 处的 O<sub>2</sub> 浓度随时间变化。观察发现, 走廊中 O<sub>2</sub> 浓度的变化速率在火灾初期大于烟气扩散室内的变化速率, 走廊中氧气浓度先达到危险值 (17%), 烟气扩散室内氧气浓度在一分钟内也降低至危险值, 并且在火灾发生 400s 以后, 走廊和烟气扩散室内的氧气浓度基本一致, 均小于 17%。烟气扩散室距火源较远时, 扩散室内氧气浓度比距离火源较近时更早达到危险值, 并且氧气浓度的最小值也比距离火源较近的扩散室内更低。

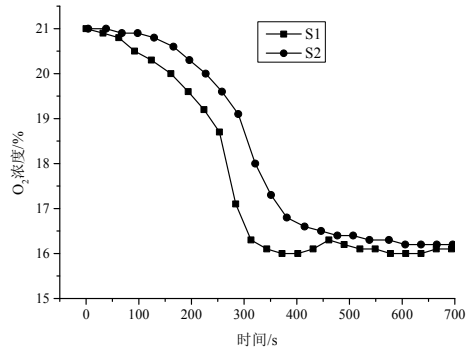


图 9 工况 1 时 O<sub>2</sub> 浓度变化

Fig.9 Comparison of O<sub>2</sub> concentration under case 1

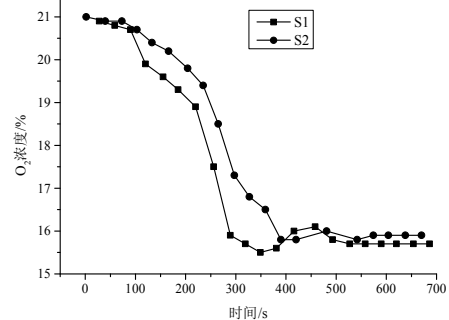


图 10 工况 2 时 O<sub>2</sub> 浓度变化

Fig.10 Comparison of O<sub>2</sub> concentration under case 2

### 3 结论

烟气在扩散过程中不断换热和沉降, 扩散室内的烟气温度比门外走廊处低, 与火源距离越近它们之间的差别越大, 扩散室内烟气的热伤害作用减弱。烟气扩散室内一氧化碳、氧气和二氧化碳等气体浓度开始变化的时间比走廊晚, 但扩散室内烟气浓度在走廊中烟气浓度达到危险值 1 分钟内也达到了危险值, 烟气扩散室内的烟气与空气充分混合后, 扩散室内烟气浓度几乎与门外走廊处相同。因此, 防护工程火灾时, 对于开着门的非火源房间, 烟气层高度降低至门上沿之前, 人员在房间内可能比较安全, 随着火灾发展, 单室对烟气聚积, 人员在单室内会非常危险, 尤其远火源端的单室危险性更高。

#### 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] 林志, 郭军, 李强. 公路隧道衬砌混凝土火灾高温下的物理力学损伤规律[J]. 公路交通技术, 2012, (6): 92-96.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Wieczorek C J, Vandsburger, et al. The Applicability of Correlations Between the Species Formation and the Global Equivalence Ratio in a 1/2 Scaled ISO Compartment with Nongaseous Fuel[M]. Proceedings of the Sixth international Symposium on Fire Safety Science. Boston: International Association for Fire Safety Science, 2000: 965-976.
- [11] Lattimer B Y, Vandsburger U, Roby R J. Carbon Monoxide Levels in Structure Fires: Effects of Wood in the Upper Layer of a Post-Flashover Compartment Fire[J]. Fire Technology, 1998, 34(4): 325-355.
- [12] 杨立中, 方廷勇, 冯文兴, 等. 远离火源位置点烟气浓度变化规律的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2004, 25(4): 717-719.
- [13] 方廷勇, 杨立中, 冯文兴, 等. 典型建筑结构中烟气毒物迁移的实验及数值分析[J]. 燃烧科学与技术, 2005, 11(1): 62-67.