

地铁车站出入口火灾烟气特性的模拟研究

朱伟, 卢平, 廖光焯, 厉培德, 洪亦修

(中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 合肥 230026)

[摘要] 利用木垛火模拟地铁火灾的演化过程, 在地铁车站出入口的缩尺度模型中进行模拟实验。采用温度相对值, 分析地铁火灾沿车站出入口烟气温度下降的规律及其影响因素。通过实验图像, 对烟气分层所需条件以及区域模拟方法在地铁火灾烟气特性研究中的适用性进行了讨论。气体成分测量结果表明, 出口处烟气中 CO 的质量分数存在阶梯状变化的规律。

[关键词] 地铁火灾; 缩尺度模型; 烟流温度; 烟气形态

[中图分类号] X928.7 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2005)02-0091-06

1 引言

地铁作为缓解城市交通紧张的有效工具, 已经在许多国家的城市中得到应用。在地铁营建与运营过程中, 火灾是不容忽视的问题。由于客流量大、人员集中, 一旦发生火灾, 极易造成群死群伤的灾难性后果。同时, 地铁火灾与地面建筑或其他地下建筑火灾相比有它的特殊性, 它与外界的联系只有车站的出入口, 发生火灾后, 人员只能由通向地面的车站出入口通道进行疏散。

烟气是造成火灾中人员伤亡的重要原因, 对于地铁火灾来说也不例外。根据对 1995 年 10 月 28 日发生在阿塞拜疆巴库地铁火灾事故的调查发现, 死亡的 558 名乘客中大多数不是由于火焰的直接作用, 而是死于烟气造成的窒息或中毒^[1]。因此, 需要对地铁火灾烟气特性进行深入了解, 尤其是研究烟气在人员疏散的唯一通道——出入口的特性, 在此基础上制定有效控制烟气危害的措施和应急预案, 保障一旦发生地铁火灾后人员的安全疏散。

对于地铁火灾烟气运动的研究主要集中在计算机模拟方面, 并编制了可用于实际的模拟程

序^[2-6]。但是, 由于地铁火灾现象的复杂性和环境条件的随机性, 模拟结果仍需要通过火灾实验数据的验证和修正。虽然真实尺度的实验数据可靠, 结果直观, 但代价昂贵, 而且对于地铁火灾实验来说危险性很大。缩小尺度的模拟实验在火灾研究中具有重要的地位, 并已应用于地铁火灾烟气特性的研究^[8], 对实际火灾防治也具有指导作用^[7]。

作者利用一个缩尺度地铁车站出入口通道模型, 通过模拟实验研究地铁火灾烟气自火源产生沿着出入口通道的温度、形态、成分等特性变化, 分析烟气对地铁火灾中人员疏散的影响, 为地铁车站的性能化设计提供参考。

2 实验模型及测量系统

实验模型由 3 部分组成, 即位于下层的地铁站站走道、通向地面的楼梯和上层地面进站口部分, 见图 1。为简便起见, 将下层走道与楼梯连通处称为入口, 楼梯与上层进站口连通处称为出口。地铁车站走道和地面进站口的模型水平放置, 总体尺寸为长 7.5 m, 宽 1 m, 高 1 m, 壁面材料为耐火砌块; 楼梯井竖直向上, 高度为 3.5 m, 轴向面积为

[收稿日期] 2004-03-18; **修回日期** 2000-05-09

[基金项目] 国家自然科学基金专项基金资助项目(50323005)

[作者简介] 朱伟(1978-), 男, 江西南昌市人, 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室博士研究生

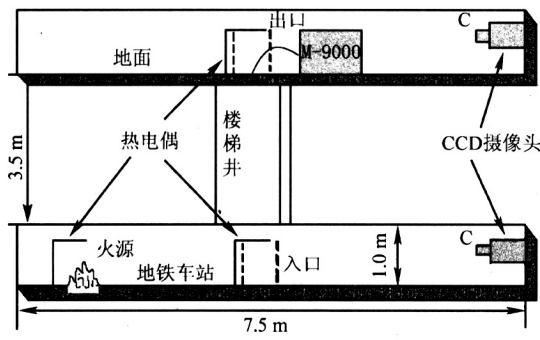


图 1 实验测量系统示意图

Fig.1 Schematic view of the experimental set-up

1 m × 1 m; 入口通道门中垂线距墙端为 4 m, 入口和出口的面积均为 0.8 m × 0.4 m。地铁车站部分通过正压送风机模拟隧道条件下的纵向通风状况, 并在实验中保持一定风速, 进站口通过横向开口与外界相连。实验中火源中心位于距端墙 1 m 处, 在火源、入口中心和出口中心 3 个位置的天花板下方 0.2 m 处各放置一个热电偶, 其间距分别为 3 m 和 4.5 m, 测量火灾产生的烟气沿程温度。为了观察火源燃烧和烟气流动的形态, 使用 CCD 摄像头及实时图像采集系统对图像进行采集。同时, 在出口位置的的中心处使用 M-9000 型燃烧分析仪, 测量烟气的成分。由于该实验不研究热烟气的微观结构, 在参数测量和计算中采用被测区域内的平均值是合理的^[11]。

3 实验工况

与一般的建筑火灾相同, 地下火灾的过程也可以分为发展阶段、稳定阶段和衰减阶段。随着可燃物性质和分布的不同, 以及通风条件的影响, 各个时间段的持续时间变化较大^[9]。选用易燃且重复性较好的木垛作为实验用燃料^[10], 图 2 为一典型木垛火的烟流最高温度随时间的变化关系。通过与类似地下建筑实际火灾测得的温度曲线 (图 3)^[9] 比较可以看出, 图 2 与实际的地铁火灾温度变化情况大致吻合。按照温度变化趋势对火灾各个阶段的划分, 将木垛燃烧与地下建筑火灾一样分为发展阶段、稳定阶段和衰减阶段, 时间分别为 t_1 、 t_2 和 t_3 。该实验各个工况的木垛结构参数及各阶段大致的持续时间如表 1 所示。木垛底端距地面 0.6 m, 正下方 0.3 m 处放置小油盘。将柴油注入油盘, 通过点燃油盘从木垛底部中心处引燃木垛。应该指

出, 该模拟实验的目的是探求烟气特性的一般规律, 如果需要获得实验的定量结果, 还需要考虑相似准则, 主要是保持火源功率的相似性^[11]。

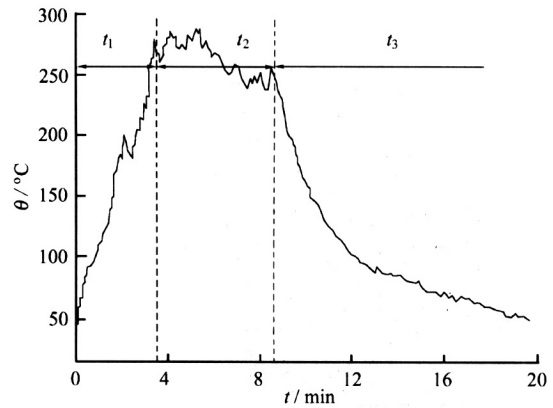


图 2 木垛火烟流在火源处温度变化曲线

Fig.2 Temperature curve of smoke flow of wood crib fire at the source

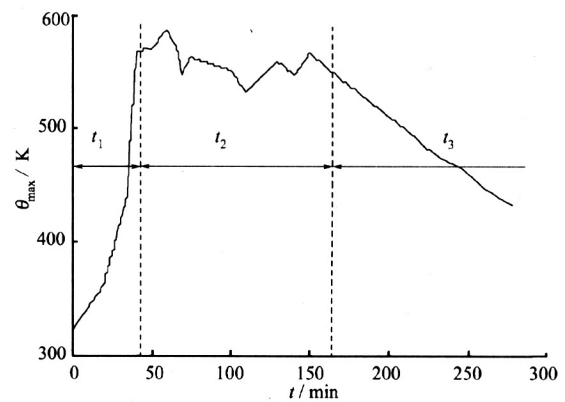


图 3 地下建筑火灾过程^[9]

Fig.3 Typical curve of maximal temperature of smoke flow of underground buildings^[9]

表 1 实验工况

Table 1 The summary of test programs

工况	每层木棍数	单根木棍规格 /mm	层数	木垛质量 /kg	t_1 /min	t_2 /min	t_3 /min
a	4	20 × 20 × 300	8	2.0	2	3	>5
b	4	45 × 45 × 300	4	6.1	5	20	>5
c	4	45 × 45 × 300	6	9.2	8	14	>10

4 实验结果与讨论

4.1 烟气在出入口沿程温度的变化

火灾烟气来自火源, 在热驱动力的作用下, 向

下风侧流动。自出入口通道向上运动后蔓延到地面^[12]。由于从火源流出的烟气是向温度较低的区域流动，需要不断与沿程的介质进行热交换，因此沿着烟气的流动方向，烟气沿程温度逐渐降低，同时，也使沿程周围环境的温度因不断接受烟流所携带的热能而升高。

在该实验中，可燃物量相对较少，燃烧受到多种因素的影响。为了表征烟气流动沿程温度变化特性，并在一定程度上消除不同实验中不可控制因素的影响，定义一个无量纲量——比温度 T^* ，代表不同热电偶测得的烟流温度 T_i 与火源区烟流温度 T_0 之比：

$$T^* = T_i / T_0, i = 0, 1, 2 \quad (1)$$

图 4 表示不同工况下沿程温度变化的关系。每个工况选取 4 个特征时段的情况，分别为发展阶段的前期和后期、稳定阶段的前期和后期。可以看到，火灾在发展阶段， T^* 较大，随着燃烧的进行， T^* 逐渐减小。但当火灾达到稳定阶段后，出入口通道的两端不同时刻的 T^* 值都比较接近。通过微元控制体能量的平衡分析，主要考虑热烟气与周围环境的热交换，忽略烟气流动过程中的动能的变化，可以得到在距离火源 x 处的烟流沿程比温度变化的关系为^[13]

$$T^* = e^{-C_1 x} + \frac{T_A}{T_0} (1 - e^{-C_1 x}) \quad (2)$$

式中， T_A 为火灾前初始温度 (K)，该实验中为 298 K； C_1 为与烟流状态及壁面材料、断面尺寸有关的参数 (m^{-1})。该实验中走道与楼梯的尺寸均为 $1 m \times 1 m$ ，壁面材料也相同，烟流状态在同一次实验过程中的影响相对较小。因此在 x 一定的情况下，当火源处的烟流温度升高， T^* 相应减小；当火灾在稳定状态时， T_0 的值较大且趋于稳定，因此在这段时间内 T^* 的值也比较稳定。

利用测得的车站入口处烟流比温度的数据，根据式 (2) 可以推算得到车站出口处烟流比温度的理论值，并与实测值同列于表 2，两者相符甚好。可见，采用木垛火作为模拟地铁火灾的火源，产生烟流的沿程温度随着与火源距离的增加按指数规律下降，与地下隧道火灾中的烟流温度变化规律类似。但同时也能看出，除了工况 a、b 的燃烧初期之外，实测值与理论值相比均偏小。这是由于出入口通道的两端存在着高度差，烟气在向上运动时，一部分热能转化为势能。

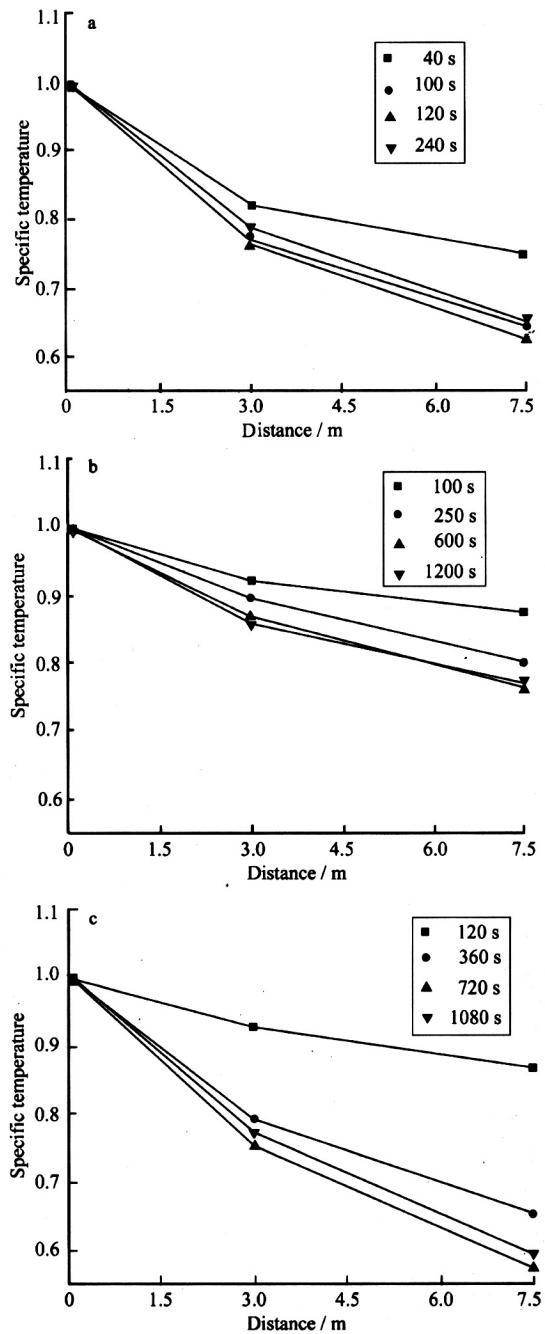


图 4 不同工况比温度 - 位置关系

Fig.4 Relation between T^* and position with different programs

另外，从图 4 还可以看出，在火灾稳定阶段后期，车站出口处的 T^* 会随着时间的增加而升高，这与烟气自通道不断流动造成的热量积聚有关。

4.2 出入口的烟气形态

利用 CCD 摄像系统实时记录烟气在走道和蔓延到出口流动后的形态。图 5 为几组工况下在稳定

表2 出口处比温度理论值和实测值

Table 2 Comparison of special temperature value gotten by theory and experiments at the exit

	时间 /s	C_1/m^{-1}	理论值	实测值
a	40	0.340	0.744	0.750
	100	0.301	0.655	0.650
	180	0.255	0.633	0.626
	240	0.247	0.656	0.650
b	100	0.217	0.870	0.873
	250	0.190	0.815	0.797
	600	0.213	0.776	0.763
	1 200	0.220	0.767	0.767
c	120	0.220	0.881	0.868
	360	0.282	0.682	0.653
	720	0.265	0.616	0.576
	1 080	0.251	0.634	0.598

燃烧阶段同一时刻下车站出入口烟气形态的图像。

图 5b、图 5c 的着火通道内上层烟气与下层空气之间存在明显的分层现象，而在地面则是弥漫在整个空间，没有明显的分层现象。图 5a 则没有明显的烟气形态出现。

在建筑火灾模拟中，常采用区域模拟进行简化，将整个着火区域分为上部的热烟气层和下部的冷空气层。然而，着火区域内烟气分层与否，与空间内烟气层和空气层的 Froude 数有关。在小的 Froude 数状态下，烟气呈分层状态。对于火灾中烟气层-空气层分层结构，Froude 数定义为：

$$Fr = \left[\frac{\rho_s \Delta U^2}{g \Delta \rho Z_s} \right]^{1/2} \quad (3)$$

式中， Fr 为 Froude 数； ρ_s 为上层烟气的平均密度； $\Delta \rho$ 为上下两层平均密度之差； ΔU 为上层烟气与下层空气的平均速度之差； g 为重力加速度； Z_s 为烟气层平均厚度^[14]。

燃烧产生的烟气由于温度较高，密度较小，与常温空气存在较大的密度差 $\Delta \rho$ ，因此 Fr 较小，同时烟流在顶棚对其下方空气的卷吸速率较低，能够沿着顶棚扩展相当长的距离。因此，实验中自火源扩散到通道入口时，能够形成分层现象。而烟气流动到地面后，温度已经明显降低， $\Delta \rho$ 变小，同时空气浮力也无法再维持上层烟气上升和向外扩展的趋势，在自身重力的作用下而沉降。经过出口蔓延到上部的烟气不会形成明显的烟气层，而是弥漫在整个空间。图 5a 由于可燃物较少，烟气产生量也相对较少，不能观察到明显的烟气形态现象。

对于地铁空间这样的长通道，烟气流动到入口

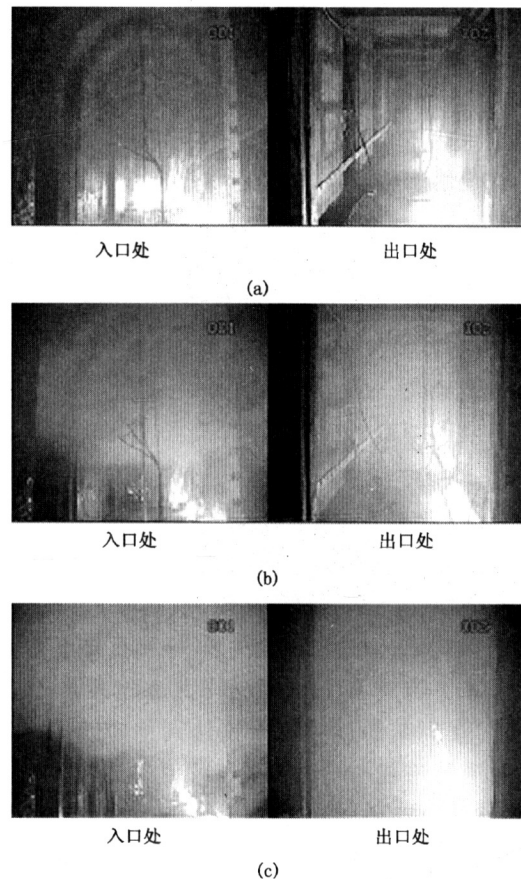


图5 同一时刻下两个区域烟气形态的图像

Fig.5 The images of smoke configuration with two areas at the same time

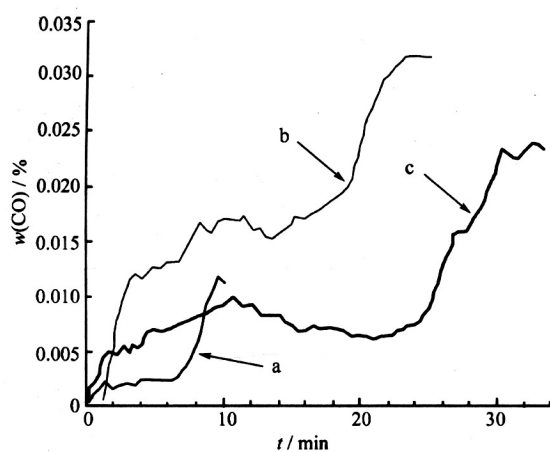
处温度有明显的下降（如图 4 所示），与下层空气的温差逐渐变小，空气浮力也有所减小，烟气在自身重力的作用下而沉降。因此，有必要将烟气沿程影响的区域进行分割，再作区域模拟的简化，使模拟结果更为合理^[15,16]。从该实验采集的图像也可以发现，入口处烟气层的高度相火源处的要低。

4.3 通道出口烟气中 CO 质量分数的变化

燃料的主要可燃性成分为碳，碳燃烧的气态产物是 CO_2 和 CO 。火灾烟流与新鲜风流相比，质量分数改变较大的组分是 CO ^[9]，同时 CO 毒性较大，因此选择作为分析对象。研究发现，实际火灾中在受到火灾烟气影响的范围内，远离火源处的 CO 质量分数反而较高^[17]。图 6 给出的是不同工况下该位置烟气中 CO 质量分数随时间变化的关系。

从图中可以看出，火灾产生的烟气流动到地面出口时， CO 浓度都存在着相似的增长—稳定—增长的阶梯状变化规律。根据图 6 中的曲线特征，与

表1中不同工况各个阶段持续时间比较,可以发现,CO浓度的第一次增长发生在燃烧的增长阶段。在这个阶段,烟气浓度随着火源强度的增长而升高。燃烧进入稳定阶段后,CO浓度也趋于稳定。而在火灾进入衰减阶段后,CO浓度会有跃升的现象。分析其原因是:由于在这个阶段,燃烧已经消耗了大量氧气,而在地下空间供氧不足,火灾将转为不完全燃烧,因此燃烧产物中CO浓度增加。在地铁等隧道火灾的扑救中,经常采用缺氧封堵的方法,因此需要注意火灾即将结束前CO浓度的变化,保证人员能够安全地从通道逃生。



a, b, c 的工况见表所示工况

图6 不同工况出口处CO浓度变化曲线

Fig.6 CO concentration curves at the exit with different programs

5 结论

在缩尺度模型中进行木垛火实验能够比较好地反映地铁火灾中车站出入口的烟气特性。从地铁火灾中人员安全疏散的角度考虑,通过对沿程烟气的温度变化、烟气中CO质量分数变化及烟气形态图像的分析,可以得到如下结论:

1) 经过竖直的出入口通道后,沿程比温度随着与火源距离的增加呈指数规律下降,但由于势能的变化,在出口处实验测量的值比理论值偏小。而且,烟气的比温度在稳定阶段的后期有所增长。

2) 当可燃物达到一定的程度,烟气在狭长的着火通道内存在分层现象,而在出口处则是弥散在整个空间。区域模拟在地铁火灾烟气危害分析中具有一定的适用性,但需要加以改进才能更为合理。

3) 出口烟气中CO的质量分数存在阶梯状变

化规律,需要特别注意地铁火灾即将熄灭前由于燃烧不完全导致烟气中CO质量分数急剧上升可能造成的危害。

总之,根据对缩尺度模拟实验的分析,得到的结果能够为地铁火灾防治提供参考。合理考虑模拟实验和实际尺寸火灾的相似性^[7],能够更好地量化分析地铁火灾烟气特性。

参考文献

- [1] 魏平安. 巴库地铁火灾的教训[J]. 消防技术与产品信息, 1996, (8): 33
- [2] Simcox S, et al. Simulation of the flows of hot gases from the fire at King's Cross underground station[J]. Fire Safety Journal, 1992, 8(1): 49~74
- [3] Li Silas K L, Kennedy W D. CFD analysis of station fire conditions in the Buenos Aires subway system[J], ASHRAE Transactions, 1999, 105(1): 410~413
- [4] Li Xianting, Yan Qisen. Numerical analysis of smoke movement in subway [J], Fire Safety Science, 1993, 2(2): 6~13
- [5] Cheng L H, Ueng T H, Liu C W. Simulation of ventilation and fire in the underground facilities[J], Fire Safety Journal, 2001, 36(6): 597~619
- [6] Chen Falin, Guo Shiachang, Chuay Heyuan et al. Smoke control of fires in subway stations [J]. Theoretical and Computational Fluid Dynamics, 2003, 16: 349~368
- [7] Quintiere J G. Scaling applications in fire research[J]. Fire Safety Journal, 1989, 15(1): 1~12
- [8] Moodie K, Jagger S F. The King's Cross fire: results and analysis from the scale model tests[J]. Fire Safety Journal, 1992, 8(1): 83~104
- [9] 张兴凯. 地下工程火灾原理及应用[M]. 北京: 首都经济贸易大学出版社, 1997
- [10] 陈玉明, 霍然. 自由空间木垛火蔓延速率及质量燃烧速率模型[J]. 上海交通大学学报, 1998, 32(1): 66~70
- [11] 董华, 张人杰, 范维澄. 烟气自通道向中厅大空间扩散的实验研究[J]. 火灾科学, 1995, 4(3): 60~66
- [12] Klote J H. Smoke movement in buildings[A]. Fire Protection Handbook [M]. 18th Edition. NFPA, Quincy, MA, 1997.
- [13] 周心权, 谢旭阳, 刘国法. 火灾烟流在建筑通道中流动的温度变化规律[J]. 中国矿业大学学报, 2002, 31(3): 221~224

- [14] Jones W W, Forney G P, Peacock R D. A technical reference for CFAST: an engineering tool for estimating fire and smoke transport [M]. National Institute of Standards and Technology, Building and Fire Research Laboratory, January 2000
- [15] Chow W K. Simulation of tunnel fires using a zone model [J], *Tunnelling and Underground Space Technology*, 1996, 11(2): 221~236
- [16] 胡隆华, 霍然, 李元洲, 等. 大尺度空间中烟气运动工程分析的多单元区域模拟方法[J], *中国工程科学*, 2003, 5(8): 59~63
- [17] Gann R G, Babrauskas V, Peacock R D, et al. Fire conditions for smoke toxicity measurement [J], *Fire and Materials*, 1994, 18: 193~199

Study on Fire Smoke Properties of Subway Station Passageway by Simulation Experiments

Zhu Wei, Lu Ping, Liao Guangxuan, Li Peide, Hong Yixiu

(*State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China*)

[**Abstract**] A series of simulation experiments, carried out on the scale model of subway station passageway are described, in which wood crib fires are used as the evolution process of subway fire. Temperature relative value is provided to analyze the law of smoke temperature along the station passageway in subway fire and its affecting factors. Based on images collected, the conditions needful for coming into being smoke layer and the applicability of zone model are discussed in the investigation of smoke properties in subway fire. Otherwise, it is also indicated from the results of smoke component measurements that CO concentration at the exit rises with stepwise change.

[**Key words**] subway fire; scale model; smoke temperature; smoke configuration; CO concentration

(cont. from p.85)

Environmental Simulation Test Technology of Modern Concrete Structures

Li Yunfeng, Wu Shengxing

(*College of Civil Engineering, Hehai University, Nanjing 210098, China*)

[**Abstract**] In order to study durability, crack controlling of concrete structures and characteristics of concrete at early age in simulated environment, environmental simulation test technology is discussed. This paper describes the successful applications of environmental simulation technique in some fields. The key techniques of environmental test of concrete structures are analyzed. The basic scheme is put forward to construct artificial climatic environmental laboratory with autocontrol and multifunction. Then the layout, function and performance of the lab is determined suitably. Finally, the equipments and instruments of the lab are discussed. Based on the research, environmental test of concrete durability and crack controlling will be better performed in the future.

[**Key words**] concrete structure; environmental test; durability; crack controlling; artificial climate