

研究报告

小尺寸实验烟气浓度分布的影响因素

黄锐, 杨立中, 冯文兴, 方廷勇, 范维澄

(中国科学技术大学 火灾科学国家重点实验室, 合肥 230026)

[摘要] 通过多组小尺寸实验多点离散测量烟气成分, 对有限的实验数据做 Lagrange 插值分析, 得到相同时刻烟气浓度在不同位置的变化规律以及烟气浓度场随时间的分布。考虑燃烧实验存在随机因素影响, 提出用某一组分的质量分数相对值来比较不同实验数据所体现的规律, 结果表明烟气浓度沿通道的一维分布受可燃物质量与流通开口高度影响较大。

[关键词] 烟气; 二维插值; 多点测量

[中图分类号] TU998.12 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2003)08-0054-05

1 引言

烟气是建筑火灾中引起人员伤亡的重要因素。在进行的多数实验中, 着重研究了在一定容积空间中, 不同建筑材料燃烧产生的烟气对生物的危害性^[1]。其他研究工作还包括在小尺寸实验条件下, 对多种能产生危害性大的烟气的特殊材料进行相关实验分析, 结果表明, 小尺寸实验对评价材料的燃烧毒性有一定效果^[2]。这类实验主要对燃烧烟气的静态特征进行研究, 对实际火灾防治起到很好的指导作用。

由于实际火灾是一个动态过程, 可燃物燃烧后, 不同时刻烟气的浓度在各空间点分布是不一样的。国外多数统计数据说明, 在吸入烟气造成的死亡中, 受害者常常不在火源房间而在较远处的其他房间^[3,4]。国内发生的一些火灾事实也证明了这点。目前国内外都在进行这方面的研究, 需要确定相关的火灾条件对烟气动态变化规律的影响, 并为建筑性能化设计提供参考依据。为此设计小尺寸实验对烟气动态浓度分布规律进行模拟研究, 测量烟气浓度在不同空间位置随时间的变化情况。

2 小尺寸实验简介

实验装置及多点测试系统如图1所示, 包括一个燃烧箱(模拟火源发生房间)和一个长通道。燃

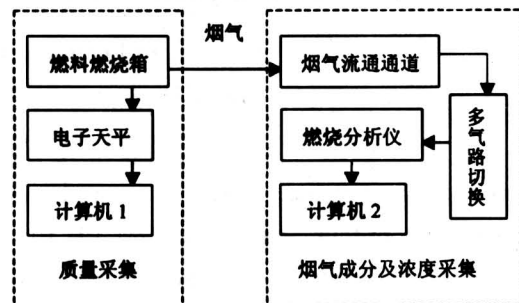
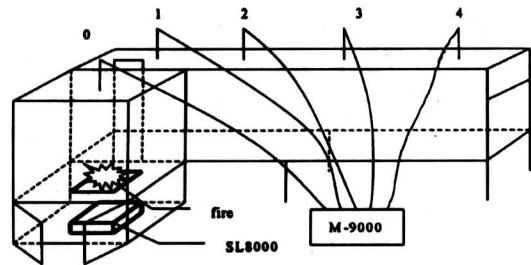


图1 多点烟气采集示意图

Fig.1 Sketch of multi-point measurement system

[收稿日期] 2003-01-23; **修回日期** 2003-04-26

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(50006012)

[作者简介] 黄锐(1975-), 男, 四川邛崃市人, 中国科学技术大学博士研究生

烧箱分为上下两部分，上部放置待燃烧的易燃材料，下部放置测量可燃物质量变化的电子天平。燃烧箱与通道之间有可调节接口面积的控制门。燃烧箱与通道上的实际测量位置分布见图 1。实验测量仪器主要包括 SL8000 型电子天平（测试燃烧物质量）和 M9000 型燃烧分析仪（测量烟气成分）。用多气路转换器，在 0~4 号点之间切换燃烧分析仪烟气采样点。实验参数见表 1。

表 1 实验条件参数选择表

Table 1 Condition of the experiment

可燃物质量/g	25	50	100
控制门开口高度/mm	200	400	600
后端排烟面积/m ²	0.1×0.4	0.2×0.4	0.3×0.4

相同条件下不同可燃物的燃烧热值和烟气量是有差异的。图 2 是纸张、布料和木材在装置中燃烧释放 CO 在烟气中的质量分数—时间曲线。可以看到，在相同通风条件下，其流动状况是相似的，即在某个测点得到的质量分数—时间曲线的趋势是相似的。同时通过相关软件（这里采用美国的 FDS 火灾动态模拟软件）模拟实际尺寸和小尺寸实验下的流动参数，并计算各自的相似数，结果也比较接近。由于研究的目的是探求烟气运动规律，这里就不赘述其具体计算过程。实际尺寸条件下的 Froude 数为 0.454，小尺寸实验条件下的 Froude 数为 0.450，其他相似数就不再一一列举。

从相关研究工作来看，小尺寸实验对实际火灾存在相当的指导意义^[2]，这也是国内外研究此类现象的主要方法。可燃物的种类不同主要影响烟气

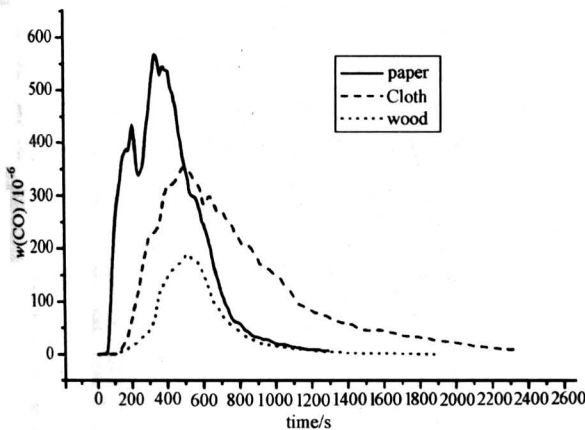


图 2 不同可燃物燃烧曲线

Fig.2 Combustion curve of different fuel

源，而对流动规律影响不是很大。因此，实验中仅用普通纸张为燃烧物，该材料易燃并且产生的烟气成分组成较稳定，使实验有较好的重复性。为了使每次实验中燃烧状态尽量一致，根据燃烧盘大小来确定可燃物的使用量，使纸张置放的松紧程度尽量相似。

3 实验数据的数学处理

用气路切换器在不同空间点及不同时刻采集烟气样，选择毒性较大的 CO 作为分析对象（以下的处理都是针对 CO 在烟气中的质量分数而言）。充分利用有限的测量条件，进行了多组烟气成分测试，得到一系列实验数据 $\{w_k(x_i, t_j)\}$ ，其中 w 是浓度， t 是时间， x 是距离。用下述数学分析方法进行数据处理。

由于数据点测量的不同，先通过二维插值方法补充相关的数据，避免对后面拟合结果造成较大偏差。在实验数据点插值后，形成二维等距平面网格点，且不偏离数据原有信息。这里主要使用二元函数的 Lagrange 插值公式，并且为了避免高次插值带来的误差扩散与放大，采用了双二次分片低次插值的做法^[5]。具体过程简要介绍如下：

设插值区域的距离方向上 $0 \leq x_0 < x_1 < \dots < x_n \leq a$ ，时间方向上 $0 \leq t_0 < t_1 < \dots < t_m \leq b$ ， $\{C(x_i, t_j)\}$ 是实验采得的数据样本。令， $x_{i+\frac{1}{2}} = \frac{1}{2}(x_i + x_{i+1})$ ， $t_{j+\frac{1}{2}} = \frac{1}{2}(t_j + t_{j+1})$ ，那么待插值点 (t, x) 对双二次插值满足

$$x_i - x_{i-\frac{1}{2}} < x \leq x_i + x_{i+\frac{1}{2}}, 1 \leq i \leq n - 1,$$

$$t_j - t_{j-\frac{1}{2}} < t \leq t_j + t_{j+\frac{1}{2}}, 1 \leq j \leq m - 1,$$

那么就选用 (x_p, t_q) 为插值结点 ($p = i - 1, i, i + 1; q = j - 1, j, j + 1$)，相应的插值多项式为

$$L_{22}(x, t) = \sum_{p=i-1}^{i+1} \sum_{q=j-1}^{j+1} l_p(x) \tilde{l}_q(t) C(x_p, t_q), \tag{1}$$

其中插值基函数

$$l_p(x) = \prod_{\substack{r=i-1 \\ r \neq p}}^{i+1} \frac{x - x_r}{x_p - x_r}, p = i - 1, i, i + 1$$

$$\tilde{l}_q(t) = \prod_{\substack{r=j-1 \\ r \neq q}}^{j+1} \frac{t - t_r}{t_q - t_r}, q = j - 1, j, j + 1.$$

如果 $x \leq x_1 - x_{\frac{1}{2}}$ 或 $x > x_{n-1} + x_{n-\frac{1}{2}}$ ，则在式

(1) 中取 $i=1$ 或 $i=n-1$; 如果 $t \leq t_1 - t_{\frac{1}{2}}$ 或 $t \leq t_{m-1} - t_{m-\frac{1}{2}}$, 则在式 (1) 中取 $j=1$ 或 $j=m-1$ 。

由上一步插值结果, 得到三维坐标系 $C-Oxt$ 中的 $n \times n$ 个点 (x_i, t_i, w_{ij}) ($i, j=0, 1, \dots, n$)。

4 烟气浓度与位置 时间的二维关系

对小尺寸实验, 由于可燃物量较小, 在相应燃烧时间内采集的实验数据也就有限, 通过插值可以使数据表征的趋势更加明显。图 3、图 4 分别是实验中 CO 的质量分数与时间、距离的关系, 经过二维插值后得到的相应曲面 (图 5)。实验条件为: 可燃物量 50 g, 开口高度 0.2 m, 后端排烟面积 $0.2 \times 0.4 \text{ m}^2$ 。

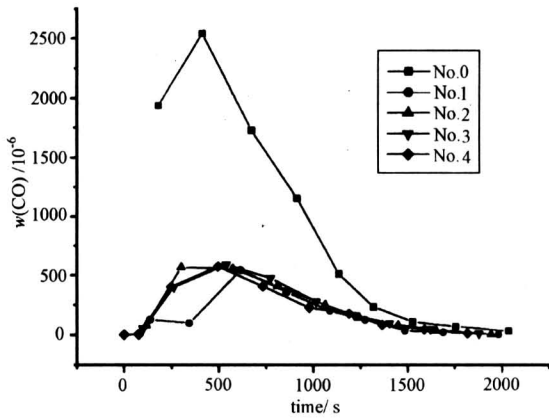


图 3 CO 质量分数—时间曲线
Fig. 3 $w(\text{CO})-t$ curve

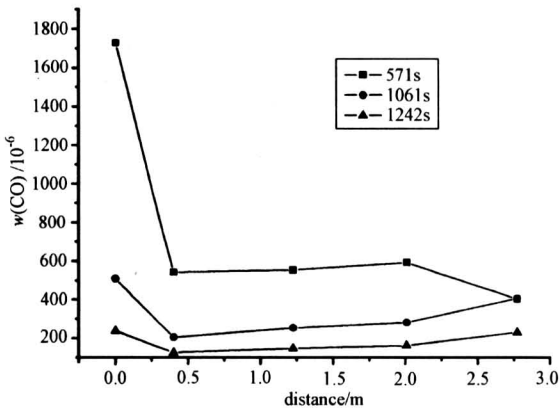


图 4 CO 质量分数—距离曲线
Fig. 4 $w(\text{CO})-x$ curve

从图 3、图 5 可以看出: a. 在时间方向上, 各点的 $w(\text{CO})$ 曲线都与单点连续测量得到的曲线

类型相同, 可参见单点测量的实验 (如图 2); b. 沿空间不同位置, 1~4 号点测得的 $w(\text{CO})$ 比较接近, 而燃烧箱中 $w(\text{CO})$ (0 号点) 则因控制条件而异, 这点将在后面讨论。随着燃烧过程的结束, $w(\text{CO})$ 趋近一致。

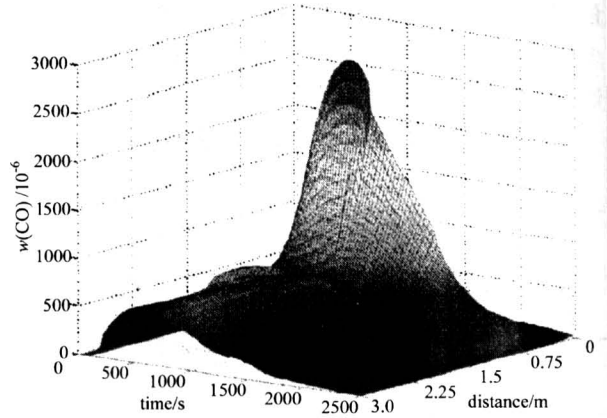


图 5 CO 质量分数二维插值曲面
Fig. 5 2D curved surface of $w(\text{CO})$

由图 4 数据还可看到, 在烟气组成变化过程的中期, 离火源较远点的 CO 质量分数较高。如图中 1 061 s 时的曲线, 除了燃烧箱内的 0 号点, 4 号点 CO 质量分数大于通道内其他各点, 并且在整个变化过程中, 位置离燃烧箱最近的 1 号点的 CO 质量分数明显比其他点要低。这种情况也出现在实际火灾中, 即远离火源处有害气体 CO 的质量分数反而较高^[3]。

出现这一现象的主要原因是烟气在压力梯度与浓度梯度的作用下向排烟出口流动时, 浓度分布不均匀。1 号点由于受到流通开口高度及测点布置的影响, 在测点附近烟气的浓度就比较低, 这在火灾分布探测中值得注意。另一方面, 由于烟气在排烟出口处的回流运动, 使得 4 号点浓度有所升高。在小尺寸实验条件下, 就使得这种通道中烟气浓度分布的规律明显表现出来了。而这一点也可以通过相关模拟计算得到证实^[6]。

此外, 实际火灾中, 烟气在流动过程与周围材料接触, 本身的传热以及部分材料与烟气的化学作用也可能对烟气浓度产生一定程度的影响。

5 浓度相对值及其影响因素

由于燃烧实验受到多种因素的影响, 质量相同的同一材料在同样条件下燃烧, 其过程还可能因随机因素的影响而有所差异。这里定义一个无量纲量

——质量分数相对值 w_r ，为 1-4 号点测得 CO 质量分数除以 0 号点质量分数：

$$w_r = w_i / w_0 \quad (i \neq 0)$$

使用质量分数相对值来比较不同实验的数据，可以在一定程度上消除不同实验间不可控制因素的影响。

5.1 CO 质量分数相对值与箱—道开口高度的关系

图 6 中曲线都是 50 g 可燃物点燃后 4 号点 CO 质量分数相对值随时间变化的趋势，不同的是燃烧箱与通道之间开口高度不一样。图 5 中开口高度分别为 200 mm，400 mm，600 mm。数据显示通道内 CO 质量分数相对值随着开口高度的增加而升高。即开口增大，燃烧箱内烟气进入通道速率加快。

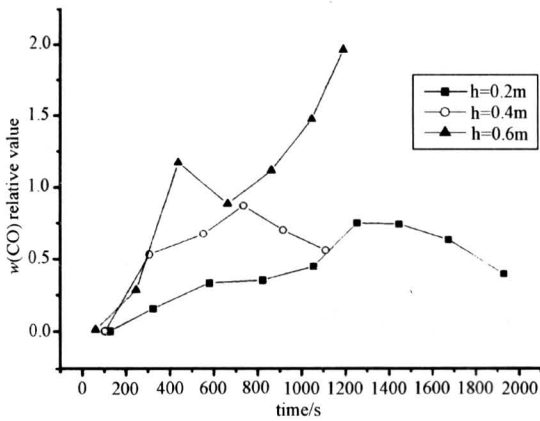


图 6 CO 质量分数相对值—时间曲线 (不同 h)

Fig.6 Relative value of $w(\text{CO})-t$ curve (with different h)

此外，控制门不同开口高度实验的过程有所差异：

- 1) 初始时燃烧箱内积聚的烟气浓度远高于通道各点，因此相对值都较低；
- 2) 随着烟气流动，各点浓度差变小，使相对值上升；
- 3) 但在最后，低开口条件下，通道内烟气消散，燃烧箱内残留的烟气使相对值又降低；高开口条件下，燃烧箱内残留烟气量较小，通道内保留的烟气使质量分数相对值持续升高。

5.2 CO 质量分数相对值与可燃物质量的关系

图 7 对应的实验条件是相同开口高度 ($h = 0.4 \text{ m}$) 和相同的后端面积大小 ($A = 0.2 \times 0.4$

m^2)，而可燃物质量分别为 25 g，50 g，75 g，图中的 CO 质量分数相对值曲线都是 4 号点的。从中看出，可燃物质量越大，平均 CO 质量分数相对值越小，说明燃烧箱中 CO 残留量较多。

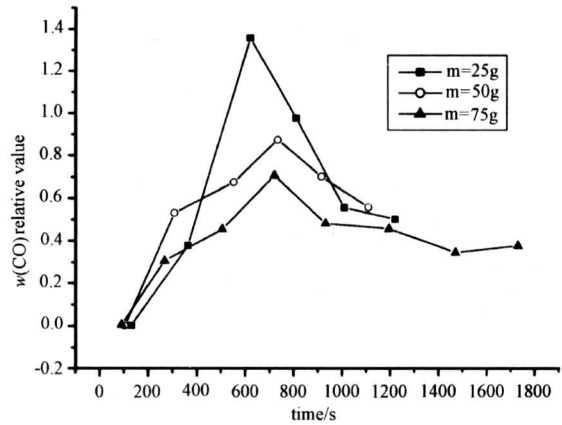


图 7 CO 质量分数相对值—时间曲线 (不同可燃物质量)

Fig.7 Relative value of $w(\text{CO})-time$ curve (with different m)

5.3 CO 质量分数相对值与通道排烟面积的关系

图 8 对应烟气的扩散条件，即后端排烟面积分别为 $0.1 \times 0.4 \text{ m}^2$ ， $0.2 \times 0.4 \text{ m}^2$ ， $0.3 \times 0.4 \text{ m}^2$ 时，4 号点的质量分数相对值曲线。多组实验数据表明，排烟面积对 CO 质量分数相对值的大小影响并不显著。

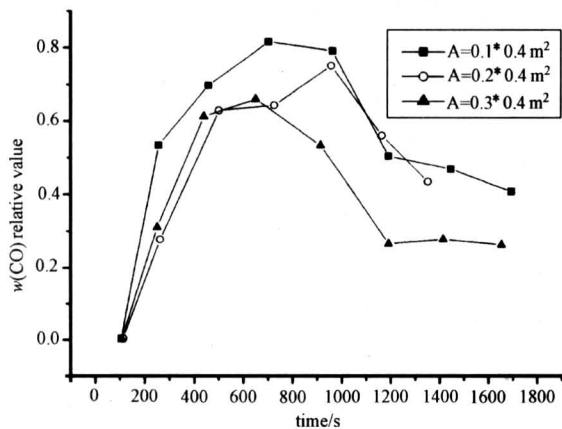


图 8 CO 质量分数相对值—时间曲线 (不同排烟面积)

Fig.8 Relative value of $w(\text{CO})-time$ curve (with different A)

此外，还考虑了其他一些影响条件，影响最大的因素是可燃物量及开口高度。

6 结论

通过对实验数据的数值分析,得到小尺寸实验条件下CO质量分数的分布曲面,从而利用有限的实验数据了解了烟气在离火源较远处的总体分布情况,以便预防建筑火灾时对布置报警探测点提供参考依据。

根据实验结果可知,烟气在空间各点随时间的变化情况是一致的,即各不同距离处CO质量分数随时间变化的曲线类型相似,从而可知,单点连续测量得到的规律可推及其他距离点,只是具体参数不一样。

另外,在自然通风条件下,相同时刻烟气在空间中的分布情况受到多种因素影响,主要是烟气流速、通风开口高度及火源可燃物量。

基本结论是:随着烟气流速通风开口高度增大,通道内的烟气相对浓度值增大;随着可燃物量的增大,烟气相对浓度值减小。

参考文献

- [1] Kaplan H L, Grand A F, Hartaell G E. Combustion Toxicology Principles and Test Methods [M]. TECHNOMIC Publishing Co. Inc. 1983
- [2] Morikawa T. Evolution of toxic gases from burning polymeric materials in a small-scale box model [J]. Fire and Material, 1998, (12):43~49
- [3] Gann R G, Babrauskas V, Peacock R D, et al. Fire conditions for smoke toxicity measurement [J]. Fire and Materials, 1994, 18: 193~199
- [4] Vandsburger U, Roby R J. Dynamics, Transport and Chemical Kinetics of Compartment Fire Exhaust Gases [M]. NIST-GCR-96-688, 1996
- [5] 颜庆津. 数值分析(修订版)[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,1999
- [6] McGrattan K B, Baum H R, et al. Fire Dynamics Simulator (Version 3)—Technical Reference Guide [M], 2002 Ed. NISTIR 6783

Influence Factors for Distribution of Smoke Concentration in Small-scale Experiment

Huang Rui, Yang Lizhong, Feng Wenxing, Fang Tingyong, Fan Weicheng
(State Key Laboratory of Fire Science, USTC, Hefei 230026, China)

[Abstract] Through using Lagrange interpolation to analyze the limited data of smoke components and concentration attained from the small-scale experiments, it shows the distribution of smoke concentration at same time from different positions and the distribution of smoke concentration field according to time. Considering the random factors existing in these combustion experiments, concentration relative value is provided to contrast data among different experiments. The result shows that distribution of smoke concentration along hallway is mainly affected by mass of fuel and height of the door.

[Key words] smoke; 2-dimensional interpolation; multipoint measurement