

# 竖井中烟气运动的非滞止状态产生的临界条件\*

张靖岩 霍然 王浩波 周吉伟

中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 合肥 230027

**摘要** 通过在小尺寸竖井实验台进行的一系列实验, 得到了烟气在竖井内运动时的温度分布, 并且对实验数据进行了无量纲处理, 分别讨论了封闭竖井和顶部开放竖井内的烟气运动状况, 得出了在两种不同环境下烟气运动的非滞止状态产生的临界特征数. 该无量纲处理方法的提出, 对于在实际情况中合理设计建筑结构以避免烟囱效应的出现具有指导意义.

**关键词** 无量纲分析 烟囱效应 竖井 非滞止状态

火灾中产生的烟气是造成人员伤亡的主要因素, 统计结果表明: 火灾中 85% 以上的死亡者是由于烟气窒息所致<sup>[1]</sup>. 在现代各类建筑中, 水平和垂直分布的各种通风、空调系统的管道及竖井、楼梯间、电梯井等是烟气蔓延的主要途径. 研究这些场合下烟气运动的基本规律, 对于有效安装防排烟设施、降低人员疏散难度、减少伤亡, 都有极其重要的意义.

本文提到的竖井根据其结构形式分为封闭竖井和开放竖井. 封闭竖井就是除了起火层与竖井相通外, 竖井的其余部分与外界完全隔离. 这相当于真实建筑中的管道井. 而开放竖井是除了起火层外, 竖井的其余部分与外界还有开口相通, 例如建筑中的楼梯井、电梯井就属于此种形式.

在封闭竖井中如果烟气流动至竖井顶部, 或者在开放竖井中产生了烟囱效应, 我们就称此时烟气处于非滞止状态. 但是这种非滞止状态的产生是有条件的, 它受到若干因素的制约, 本文就是通过分析这些制约因素的相互作用, 再利用无量纲分析方法确定烟气的非滞止状态产生的临界条件.

## 1 烟囱效应

烟气在竖井式建筑内的运动主要是靠烟囱效应的作用. 通常情况下, 建筑物内部较热而外部较冷,

在内部便产生了使气体向上运动的浮力, 气体运动得到加强, 这种现象就是烟囱效应<sup>[2]</sup>. 在开放竖井中这种现象更为明显. 图 1 为典型建筑内楼梯间、电梯井所产生烟囱效应示意图.

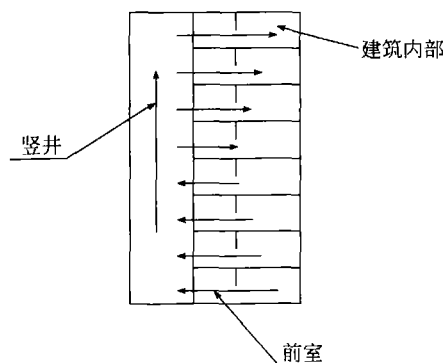


图 1 烟囱效应示意图

(图中箭头表示空气运动的方向)

在标准大气压下, 烟囱效应压力差公式可以统一用下式表示:

$$\Delta P = 3460 \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_s} \right) h,$$

式中  $\Delta P$  为压力差(Pa),  $T_0$  为室外空气温度(K),  $T_s$  为竖井内空气温度(K),  $h$  为中性面以上的距离(m).

2004-07-27 收稿, 2004-09-13 收修改稿

\* 国家重点基础研究发展规划专项经费资助(项目编号 2001CB409604)

E-mail: zjy@mail.ustc.edu.cn

Harmathy 于 1998 年介绍了一种新的烟囱效应简化模型<sup>[3]</sup>. 该模型忽略了空气运动产生的压力损失, 认为竖井内的压力可以近似由下式表示,

$$P_s = -g\rho_a^0 \frac{T_0}{T_i} z + P_s'',$$

其中  $g$  为重力加速度 ( $9.81 \text{ m/s}^2$ )  $T_i$  为建筑内部温度 (K),  $z$  为建筑高度,  $\rho_a^0$  为空气在 273 K 时的密度 ( $1.292 \text{ kg/m}^3$ ),  $P_s''$  为一个适当的参考压力 (Pa), 它取决于竖井开口方式 (分为顶部开口、底部开口、全封闭). 这种方法不必考虑中性面位置就可以得出各种情况下竖井内部的压力分布.

Harmathy 还利用通过建筑外墙和竖井墙壁的空气流速提出了垂直竖井和外部空气的压差计算公式

$$P_a - P_s = \frac{1}{2} \rho_a^0 T_0 \left( \frac{u_w^2}{\sqrt{T_a T_i}} + \frac{u_s^2}{T_i} \right),$$

式中  $T_a$  为外部空气温度 (K),  $u_w$  为通过建筑外墙的泄漏空气流速,  $u_s$  为通过竖井墙壁的泄漏空气流速.

但是上述模型都存在下列问题:

(1) 这些模型都是描述烟气在竖井中运动的稳态过程, 无法显示烟气开始进入竖井并且在竖井中上升的非稳态过程;

(2) 模型中假设竖井内温度均一, 与实际情况有出入, 对结果有一定的影响;

(3) 大多数的模型都是从理论推导而来, 缺乏足够的实验依据和不同条件 (包括火源位置、竖井结构形式等) 下的适用性.

针对以上问题, 本文通过在小尺寸竖井实验台进行的一系列实验, 提出利用无量纲分析来确定竖井式建筑内烟气的非滞止状态产生的临界条件.

## 2 小尺寸实验模拟

火灾学中的实验一般包括原型实验和模型实验两大类. 原型实验是指在实际设备上或实际环境中进行的实验研究. 一般情况下, 原型实验规模较大、需要测试的参数很多, 所花费的人力、物力、财力都很大, 且具有危险性. 此外, 不少过程无法进行

原型实验, 因此有关规律性或装置性能的实验大部分是模型实验.

### 2.1 模化的基本依据——相似理论<sup>[4]</sup>

模化是依据物理现象之间的相似性, 通过模型研究以了解原型特征的一种方法. 但是, 模型实验与原型实验是两个不同的过程, 要使模化的结果正确反应原型的特征, 模拟实验必须满足一定的条件, 即相似理论.

烟气在竖井中的运动过程主要是传热、传质过程<sup>[5,6]</sup>, 应当满足以下一些基本条件: 物理类型相似、时空相似、边界条件与初始条件相似、流动的特征性质相似. 基于此相似理论, 我们设计了小尺寸竖井烟气运动实验装置.

### 2.2 小尺寸竖井实验台简介

本实验台依据相似准则进行设计, 具体尺寸如图 2 所示. 实验台由三部分组成: 竖井、前室和集烟罩, 其中竖井部分安装有玻璃窗以便观察. 燃料为乙醇, 油盘直径 7 cm, 置于前室部分. 热电偶串布置于竖井部分中心线上, 从下到上记为热电偶 1, 2, ..., 5, 用来测量进入竖井内的烟气温度. 实验过程中环境温度 20℃. 用摄像机记录整个实验过程, 如此布置也为处理实验数据提供了依据.

### 2.3 实验安排

本实验通过调整火源距竖井中心线的距离来改变进入竖井内的烟气温度. 在实验进行当中利用摄像机对实验过程进行录像, 然后通过录像结果进行分析来判断是否产生烟囱效应 (此时火焰应明显地被“吸”入竖井部分). 在封闭竖井中根据竖井顶部的热电偶的温升来判定烟气是否蔓延到竖井顶部. 通过测量得到的温度值计算得到各种无量纲准则数的值, 并把此无量纲准则数作为烟气的非滞止状态产生的临界值.

### 2.4 实验结果及初步分析

实验结果见表 1. 其中, 竖井底部的温度值取法如下: 在封闭竖井中, 当顶部热电偶所测温度刚稳定时, 记下该时刻底部热电偶测量到的温度值, 即作为竖井底部温度; 在开放竖井中, 当产生明显的烟囱效应, 并且竖井顶部有热烟气溢出时, 底部热电偶测量到的温度值就作为竖井底部温度值.

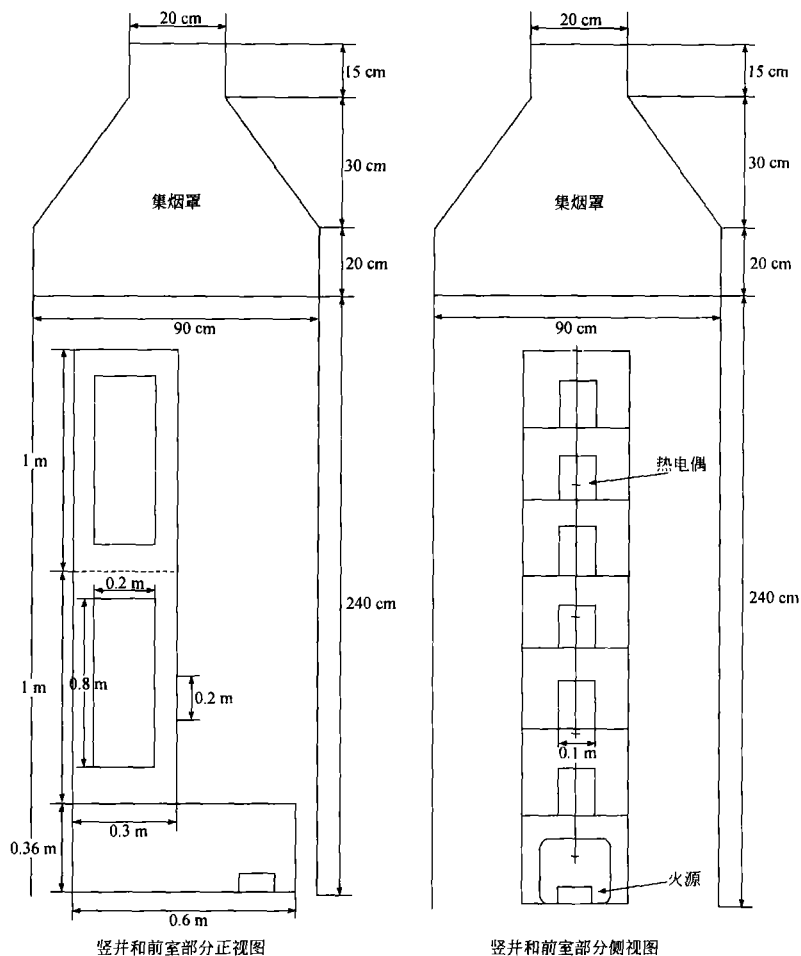


图2 小尺寸竖井实验台示意图

分析表1可知,在竖井顶部封闭情况下,竖井部分内与火源相邻的区域温升减小到5℃左右时,烟气就很难上升了;在顶部开放的情况下,竖井部分内与火源相邻区域的温升减小到8℃左右时就不会出现明显的烟囱效应。

图3分别为封闭竖井和开放竖井的内部烟气温度随时间变化的实测曲线。从图中可以看出,在相同的火源情况下(都是处于前室中间位置),封闭竖井内部烟气温度普遍比开放竖井内部温度高,而且,在开放竖井中,由于烟囱效应的作用,外界空气向竖井内卷吸度大幅增加,烟气流速加快,从而竖井内的温度梯度比较一致,在稳态情况下近似一特定的值。同时从图3(a)中还可以看到,与其他几支热电偶所测温度相比,处于最底端的热电偶1所测的温度并不是最高的。这是因为:进入此封闭竖

表1 小尺寸竖井实验结果

竖井顶部开口情况	竖井底部温度/℃	竖井顶部温度/℃	烟气是否进入竖井
顶部封闭	68.3	42.2	是
顶部封闭	57.3	38.6	是
顶部封闭	39.3	38.4	是
顶部封闭	32.0	36.1	是
顶部封闭	25.0	29.1	是
顶部封闭	23.4	20.1	否
顶部封闭	22.3	20.0	否
顶部打开	45.6	30.0	是
顶部打开	50.8	30.8	是
顶部打开	41.7	33.5	是
顶部打开	35.2	33.9	是
顶部打开	28.1	36.1	是
顶部打开	23.5	22.4	否
顶部打开	21.4	24.8	否

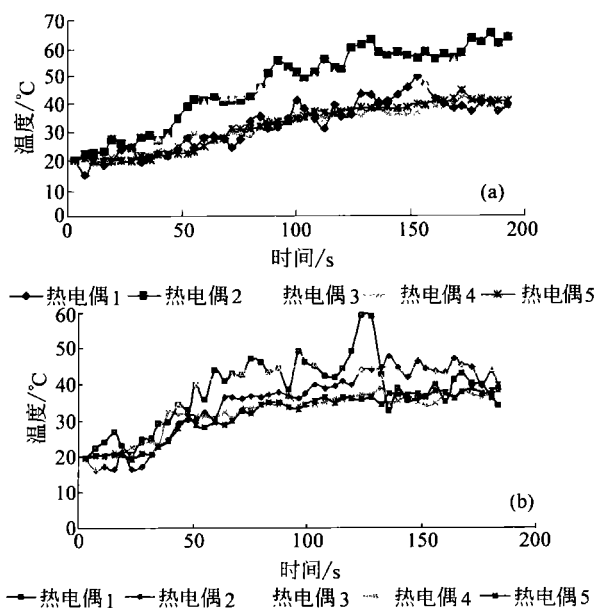


图3 竖井内部烟气温度随时间变化  
(a) 封闭竖井情况；(b) 开放竖井情况

井的烟气是依靠自身浮力自然填充的,可能在上升过程中没有接触到热电偶1;而在开放竖井中,外界空气的大量卷入,促使烟气充分填充了整个竖井,产生了较一致的“下高上低”的温度分布,这也从一个侧面反映出烟囱效应与自然充填的区别.图4为自然充填与产生烟囱效应情况下烟气运动示意图.

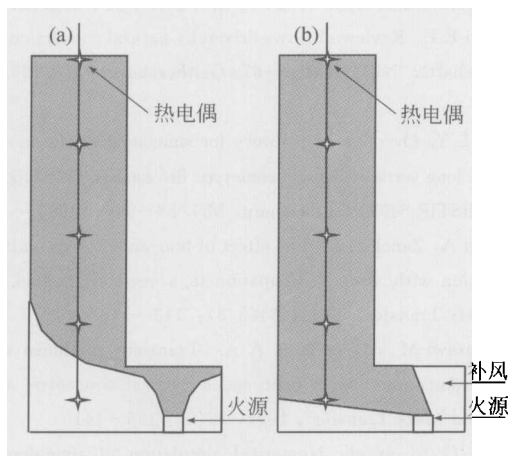


图4 竖井内烟气运动示意图  
(a) 自然充填情况下；(b) 烟囱效应作用下

### 3 实验结果的无量纲分析

在传热传质理论中 Grashof 数  $Gr$  作为一特征

数,表示浮升与粘性力之比.前人已经利用过  $Gr$  数来研究温差引起的自然对流现象<sup>[7-9]</sup>,这种方法主要是用于有外加热源情况下受热气体在平板之间的运动.但是,烟气在竖井中的运动主要是靠温差引起的浮力,在竖井部分与外界有开口相通的情况下还受到内外压差的综合作用,而且相对于周围环境来说,烟气是热源,故此时需要重新考虑利用  $Gr$  数来研究竖井内的烟气运动.

粘性不可压缩流体的定常自然对流换热过程中,由于需要考虑到温度不同引起的浮力影响,则  $z$  方向上的运动方程(Navier-Stokes 方程)<sup>[10]</sup>可表示如下:

$$\rho \left( v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = \rho g - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) + \rho \beta g \Delta T,$$

各项从左至右依次表示:惯性力、重力、静压、粘性力、浮力.

在封闭竖井中,影响烟气运动的主要为浮力与粘性力<sup>[11]</sup>,将两项相比得:

$$\frac{\rho \beta g \Delta T}{\mu \left( \frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right)} - \frac{\rho \beta g \Delta T}{\mu \frac{v}{l^2}} = \frac{\rho \beta g l^2 \Delta T}{\mu v},$$

将此式乘上  $Re$ (惯性力与粘性力之比),消去速度项,得  $Gr = \frac{g l^3 \beta \Delta T}{\nu^2}$ .式中,  $\Delta T$  为烟气与外界环境温度差;  $\nu$  为流体的运动粘度;  $\beta$  为流体的体积膨胀系数;  $l$  为系统的特征尺寸,本文取竖井截面积与高度的比值  $A/H$ .数  $Gr$  数反映的是浮力与粘性力之比.

在开放竖井中,影响烟气在竖井中的运动主要为浮力( $F$ )、竖井内外静压差( $\Delta P$ )、竖井壁对烟气的粘性力( $N$ )<sup>[11]</sup>,其中浮力和静压差能够促进烟气在竖井中上升,粘性力对烟气的上升起抑制作用,为了体现这3种力对烟气的综合作用效果,我们采用浮力和静压差与粘性力之比(即  $F^2 \times \Delta P^2 / N^2$ ,其中  $x, y, z$  为正数).在相似准则中,各种特征数的定义如下:  $Gr$  为浮力与粘性力之比,  $Eu$  为静压力与惯性力之比,  $Re$  为惯性力与粘性力之比.因此浮力、竖井内外静压差和粘性力三者的比值又可以变

换成如下关系式:

$$F^x \times \Delta P^y / N^z = \\ (F/N)^a \times (\Delta P/G)^b \times (G/N)^c = Gr^a Eu^b Re^c,$$

此处  $G$  为惯性力。为了消去一些未知项(如速度项),并且在保证正确的物理意义的同时使计算简化,这里取  $a=b=1, c=2$ 。修正后的  $Gr^*$  计算公式可表示如下:

$$Gr^* = GrEuRe^2 = \\ \frac{gl^3\beta\Delta T}{v^2} \times \frac{\Delta P}{\rho v^2} \times \frac{v^2 l^2}{v^2} = \frac{gR\beta\Delta T^2 l^5}{v^4},$$

$Gr^*$  反映的是浮力和静压差与粘性力之比。

这样,根据上述实验结果就可以得出各种工况下的特征数值,计算结果见表2。

表2 无量纲计算结果

竖井顶部 开口情况	竖井底部 温度/℃	竖井顶部 温度/℃	烟气是否 进入竖井	$Gr$	$Gr^*$
顶部封闭	68.3	42.2	是	$1.80 \times 10^5$	—
顶部封闭	57.3	38.6	是	$1.62 \times 10^5$	—
顶部封闭	39.3	38.4	是	$1.09 \times 10^5$	—
顶部封闭	32.0	36.1	是	$7.54 \times 10^4$	—
顶部封闭	25.0	29.1	是	$3.50 \times 10^4$	—
顶部封闭	23.4	20.1	否	$2.44 \times 10^4$	—
顶部封闭	22.3	20.0	否	$1.68 \times 10^4$	—
顶部打开	45.6	30.0	是	—	$1.58 \times 10^{14}$
顶部打开	50.8	30.8	是	—	$1.24 \times 10^{14}$
顶部打开	41.7	33.5	是	—	$9.90 \times 10^{13}$
顶部打开	35.2	33.9	是	—	$5.78 \times 10^{13}$
顶部打开	28.1	36.1	是	—	$2.00 \times 10^{13}$
顶部打开	23.5	22.4	否	—	$4.22 \times 10^{12}$
顶部打开	21.4	24.8	否	—	$7.15 \times 10^{11}$

由表2可以看出:在封闭竖井中,当与火源相邻的竖井区域温度达到  $25^\circ\text{C}$ ,即与室温温差为  $5^\circ\text{C}$  时,烟气上升就不明显了。因为此时烟气温升较小,产生的浮力也小,不能克服粘性阻力作用,此时对应的  $Gr$  数为  $3.50 \times 10^4$ 。同样,在开放竖井中,与火源相邻的竖井区域温度在  $28.1^\circ\text{C}$ (与室温温差为  $8.1^\circ\text{C}$ ) 以下时,没有出现明显的烟囱效应,此时对应的特征数  $Gr^*$  为  $2.00 \times 10^{13}$ 。由此我们可以定义  $Gr=3.50 \times 10^4$  和  $Gr^*=2.00 \times 10^{13}$  分别为判定封闭竖井与开放竖井中烟气的非滞止状态产生的临界

特征数。

#### 4 结论

本文通过在小尺寸竖井实验台进行的一系列实验,得到了烟气在竖井内运动的温度分布,发现封闭竖井和开放竖井的烟气运动过程有很大的差别:封闭竖井内的烟气运动过程是先填充前室,再向竖井内蔓延;而在开放竖井中,由于烟囱效应的作用,烟气被直接“吸”入竖井。另外,本文还对实验数据进行了无量纲处理,在开放竖井条件下提出利用修正后的  $Gr^*$  数来判断是否产生烟囱效应。从实验结果可以看出,烟气产生较为明显的上升运动的条件是:在封闭竖井中,与火源相邻的竖井区域的热空气  $Gr$  数大于  $3.50 \times 10^4$ ;而在顶部开放的竖井中,与火源相邻的竖井区域的热空气  $Gr^*$  数大于  $2.00 \times 10^{13}$ 。

#### 参 考 文 献

- Hietaniemi J, et al. Burning characteristics of selected substances; Production of heat, smoke and chemical species. *Fire and Materials*, 1999, 23(4): 171—185
- 霍 然,等. 建筑火灾安全工程导论. 合肥:中国科学技术大学出版社, 1999
- Harmathy T Z. Simplified model of smoke dispersion in buildings by stack effect. *Fire Technology*, 1998, 34(1): 229—247
- 霍 然. 工程燃烧概论. 合肥:中国科学技术大学出版社, 2001
- Zukoski E E. Review of flows driven by natural convection in adiabatic shafts. NISTGCR95—679 Gaithersburg, MD, 469. Oct. 1995
- Cooper L Y. Overview of a theory for simulating smoke movement through long vertical shafts in zone-type fire models. NIST论文集, 1994 MISTIR 5499. Gaithersburg, MD, 93—94pp, 1994
- Barletta A, Zanchini E. The effect of buoyancy forces on laminar convection with viscous dissipation in a vertical channel. *Heat and Mass Transfer*, 1998, 34(2/3): 143—149
- El-Shaarawi M A I, Negm A A A. Transient combined natural convection-conduction in open-ended vertical concentric annuli. *Heat and Mass Transfer*, 1999, 35(2): 133—141
- Barozzi G S, et al. Numerical simulation of time-dependent buoyant flows in an enclosed vertical channel. *Heat and Mass Transfer*, 1999, 35(2): 89—99
- 葛新石,等. 传热的基本原理. 合肥:中国科学技术大学出版社, 1985
- Benedict L, Zukoski E E. Buoyant flows in shafts. NIST论文集, 1996 MISTIR 5904. Gaithersburg, MD, 69—77. 1996