

受限空间近壁烟羽流准稳态 温度场的实验研究

张人杰 袁理明 楼建宇

(中国科技大学北京研究生院, 北京 中国科学技术大学, 合肥, 230026)

摘 要

本文研究了受限空间近壁烟羽流的准稳态温度场。实验结果表明水平横截面上的温度分布近似于高斯分布, 最高温度与到火源的距离之间的关系近似于非受限烟羽流中二者之间的关系, 但两个系数不同。本实验得到 $c=7.3$, $n=-1.62$ 。实验中还发现, 当烟羽流的葛拉晓夫数 $Gr < 2 \times 10^{-7}$ 时, 烟羽流处于不稳定状态, 同时给出了处于不稳定状态时的温度分布。

关键词: 羽流 浮力

1. 引言

建筑物内初起的火焰热强度较低, 火焰上方的热烟气在浮力作用下形成烟羽流, 烟羽流的结构及其传播规律, 在建筑火灾的形成及蔓延过程中起着重要的作用。在烟羽流内, 由于密度梯度与压力梯度的方向不同, 流场非正压, 形成缓慢上升的大尺度旋涡, 旋涡不断地产生和衰变, 构成了非等温、非各向同性的湍流运动。

对于非受限空间烟羽流的准稳态温度分布规律, Yokoi, Heskested, Cox 和 Zukoski 等人作过基础性的研究。他们从基本守恒关系出发, 运用量纲分析的方法, 得到非受限轴对称烟羽流在水平横截面上的最大温升 $\Delta T_{max} = T_{max} - T_{\infty}$, 与距点热源高度 z 之间的关系: $\Delta T_{max} \propto z^{-\frac{5}{3}}$, T_{max} 是该横截面上最高统计平均温度, T_{∞} 是环境空气的温度。横截面上各点的温升 $\Delta T = T - T_{\infty}$, 沿水平径向座标 r 的分布关系可以整理成:

$$\frac{\Delta T}{\Delta T_{max}} = \exp\left[-\left(\frac{r}{\sigma}\right)^s\right] \quad (1)$$

上式中 σ 是烟羽流横截面的半宽度, s 是待定经验常数, 若取 $s = 1.5$, 则(1)式称为 Yokoi 分布。

受限空间是指建筑物的房间或走廊等具有侧壁的空间。研究受限空间烟羽流结构及其传播规律, 接近火灾工程的实际情况。由于受限空间侧壁及顶蓬下的热烟气层和环境温度的变化等对烟羽流的结构及蔓延规律都有影响, 且近壁烟羽流不具备轴对称性, 因此, 研究其基本规律在理论分析和实验上都很困难。

本文假设准稳态烟羽流区的无量纲温度和速度在各个横截面上的分布函数是相似的，由横截面的动量、能量、质量的守恒关系出发得到了指导实验的关系式，在实验中精确测量单室内近壁烟羽流各点的实时温度，得到统计平均温度的空间分布，符合湍流场的描述法。

2. 理论分析

分析受限空间烟羽流的结构，求解严格的动量、能量、质量和涡量的微分方程组是很费机时的，计算量太大，况且，边界条件难以合理地确定，而采用湍流方程的方法也必须以实验数据为依据。因此烟羽流结构及传播规律的实验研究依然是基本的研究途径。相似原理是实验的理论基础，现假设在一定条件下，已形成了准稳态的烟羽流，在烟羽流内可以写出竖直 z 方向的守恒关系，设烟羽流水平横截面面积是 S_p ， z 方向的均流速度 u ，横向水平卷吸速度 v ，于是有

$$\frac{d}{dz} \int_{S_p} \rho u^2 ds = - \int_{S_p} g(\rho - \rho_\infty) ds \quad (2)$$

$$\frac{d}{dz} \int_{S_p} \rho u ds = \int_{S_p} \rho v ds \quad (3)$$

$$\frac{d}{dz} \int_{S_p} C_p (T - T_\infty) \rho u ds = Q_{conv} - Q_{los} \quad (4)$$

上式中 C_p ， ρ ， T 分别是气体的比热、密度和温度， Q_{conv} 是 z 横截面对流输入的热量， Q_{los} 是烟羽流向壁面和环境的热损失，Boussinesq 假定是 $\rho - \rho_\infty = -\rho_\infty \alpha (T - T_\infty)$ ， α 是气体的热膨胀系数，那么方程(2)反映气体的热焐向流动动能的转换，方程(4)中右方两项包含了湍流耗散能量和辐射热交换。

如果上述方程组中所列参数都能够实验测定，则可以确定烟羽流沿 z 方向的发展规律。

取给定横截面上参数的最大值作为该截面的特征参数，则上述方程组中的积分可以化为无量纲参数的积分。实验表明，准稳态烟羽流的无量纲参数在各横截面上的分布函数是相似的，故可以假设上述方程组中无量纲参数的积分值与 z 无关。横截面上参数最大值标以下标 0。则上述方程可以简化为：

$$\frac{d}{dz} (\rho_0 u_0^2 s_p) = c_1 g \rho_0 s_p \quad (5)$$

$$\frac{d}{dz} (\rho_0 u_0 s_p) = c_2 \rho_0 u_0 \quad (6)$$

$$\frac{d}{dz} (c_p \rho_0 u_0 \Delta T_{max} s_p) = c_3 (Q_{conv} - Q_{los}) \quad (7)$$

如果不计辐射热交换和湍流能量耗散，可以取 Q_{conv} 等于烟源的热强度 Q^* ，现假设：

$$s_p \propto z^2; c_2 \propto z; u_0 \propto z^m; \Delta T_{max} \propto z^n; v \propto u_0; \rho_0 = \rho_\infty$$

则由上述方程组可得：

$$\frac{\Delta T_{max}}{T_\infty} = c \left(\frac{Q^*}{\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{3}} z^n \quad (8)$$

式(1)和(8)可以作为实验研究的依据。常数 s ， c 和 n 由实验确定。

3. 实验装置

本实验在单居室 1/2 尺寸的模型房间内进行，室内空间 $2.5 \times 2 \times 1.6m^3$ ，门窗分别安装在前后相对两墙上，烟源安放在侧墙中间距左墙 12.5cm 的地面上。参考坐标系的原点取在烟源上，z 轴竖直向上，x 轴是平行于侧墙的水平方向，y 轴垂直于侧墙。自制烟源是灯芯式燃烧器，调整灯芯改变其热强度，使用 70% 煤油和 30% 机油的混合燃料，电子秤记录耗油量，以确定烟源的功率 Q^{\cdot} 。

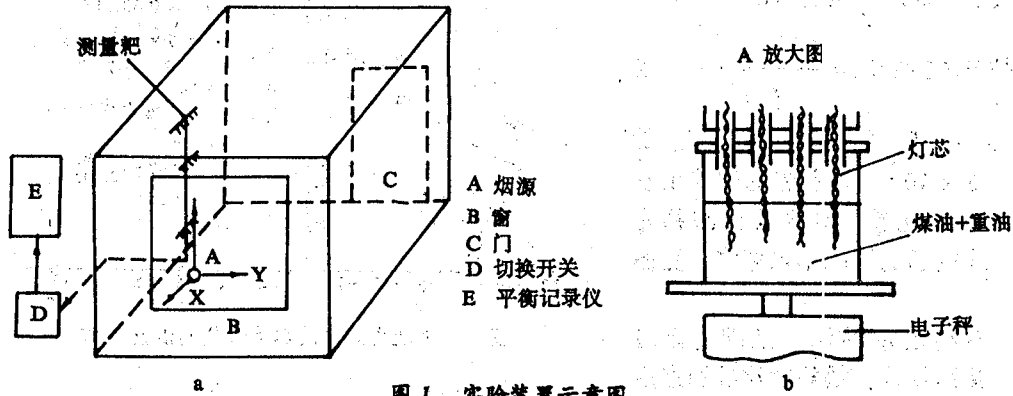


图 1. 实验装置示意图

a. 实验装置, b. 烟源结构

八支 NiCr—NiSi 热电偶装配成测量耙，热偶丝直径 0.2mm，相邻两热电偶结点之间距离 30mm，单支热电偶经过 UJ-37 电位器和管式电炉校验，特别是 0~100℃ 的使用温度范围要精确校验，所得校验曲线作为整理实验数据的依据。三个测量耙统一连接到切换开关箱，一次切换八支热电偶接点，连接八笔自动平衡记录仪 E。热电偶焊接点直径 0.3mm，其热惯性很小，可以记录测点气流温度的即时值，记录的曲线是 10Hz 左右的毫伏曲线，经过统计平均而得到测点的平均温度。

为了形成准稳态的烟羽流，在烟源点火后 1'~1'30" 时进行测量。室内环境温度的变化是分钟的数量级，而温度测量在 5~10 秒的时间范围内进行，故所测温度是准稳态的 t 时刻的温度。

4. 实验结果

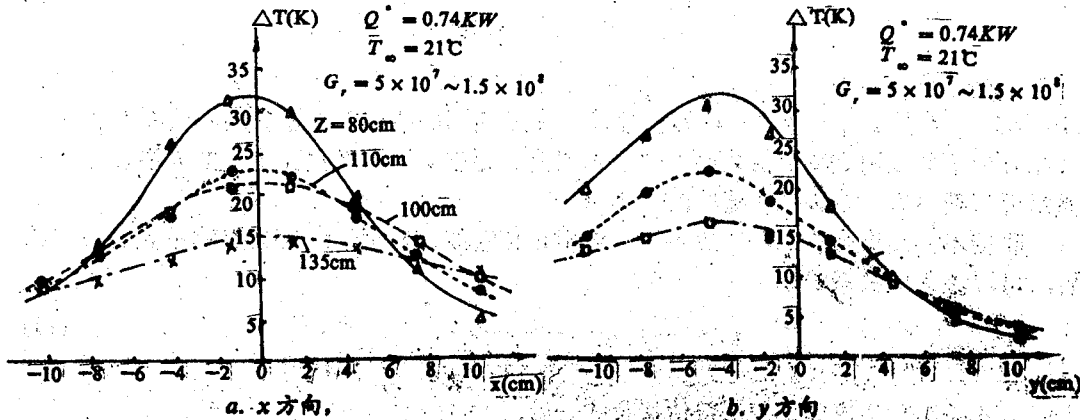


图 2. 烟羽流水平横截面的温度分布

实验选择烟源强度 0.4~1kw, 属于低强度热源, 烟源点火后 1' 形成准稳态烟羽流, 测量持续时间 10", 测量靶平面距烟源高度 z 取 80cm, 100cm, 120cm, 135cm 四个位置, 靶上热电偶焊结点连线的中点在 z 轴上, 沿近壁方向取 x 轴, 垂直近壁方向取 y 轴。测量靶热电偶焊结点连线在上述四个高度上分别安放在 x 方向和 y 方向, 得到烟气羽流不同高度的温度沿 x 方向和 y 方向的水平分布曲线, 见图 2。

取烟羽流横截面的高度 z 为特征尺度, ΔT_{max} 为特征温差, 计算

$$格拉晓夫数 Gr = \frac{g \Delta T_{max} L^3}{T_0 v^2}, \text{ 当}$$

烟源强度较低时, 流场的 $Gr < 2 \times 10^7$, 烟羽流的轴线出现缓慢摇摆现象, 烟羽流失去稳定性, 冷壁面的影响不可忽略, 见图 3。

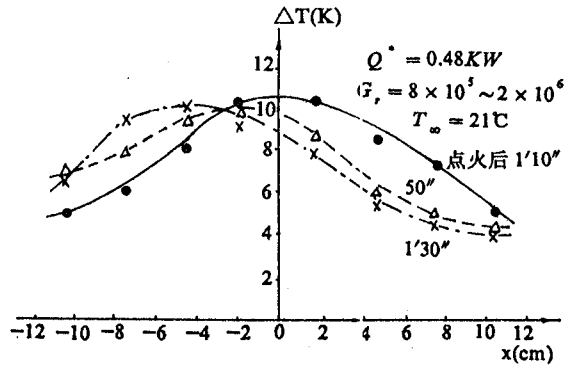


图 3. 不稳定烟羽流水平横截面温度分布

不稳定烟羽流不是准稳态过程, 其结构及传播规律比准稳态烟

羽流更加复杂, 如果将图 3 摇摆的曲线校正到 z 轴, 则图 2 和图 3 表明: 沿 x 方向是对称的近高斯分布曲线; 沿 y 方向是截断的近高斯分布曲线。横截面上最大温差 ΔT_{max} 点的连线向近壁面方向偏移, 在准稳态烟羽流区其偏移量 γ 大体上是常数, 本实验表明 $\gamma = 4.2cm$ 。

x 方向温度分布关系可以整理成:

$$\Delta T(z) = \Delta T_{max}(z) \exp\left[-\left(\frac{x}{\sigma_\theta}\right)^2\right] \quad (8)$$

y 方向温度分布关系可以整理成:

$$\Delta T(z) = \Delta T_{max}(z) \exp\left[-\left(\frac{y-\gamma}{\sigma_\theta}\right)^2\right] \quad (9)$$

准稳态近壁烟羽流横截面上最大温差 ΔT_{max} , 随高度 z 的变化关系为:

$$\frac{\Delta T_{max}}{T_\infty} = 7.30 \left(\frac{Q \cdot}{\rho_\infty c_p T_\infty \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{3}} z^{-1.62} \quad (10)$$

对于非受限空间准稳态烟羽流, 式(8)中的两个常数分别是 $c = 9.11$ 和 $n = -1.67$ 。与式(10)比较, 两者是很接近的, 在烟源强度和高度相同的条件下, 近壁烟羽流横截面上最大温升低于非受限烟羽流横截面上的最大温升。近壁烟羽流横截面上 y 方向温度分布是截断近高斯分布, 这表明冷壁面的影响。

联接不同高度烟羽流的外边界, 大体上近似直线, 其延长线的交点就是虚点源的位置, 可以整理成关系式:

$$z_0 = -1.6 \left(\frac{Q \cdot}{c_p \rho_\infty T_\infty \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (11)$$

上式与非受限烟羽流虚点源位置估算公式一致。

5. 讨论

(1) 受限空间近壁烟羽流, 当烟源强度 $Q^* < 0.5\text{kw}$ 时, 烟羽流失去稳定性, 左右摇摆, 对应的 $Gr < 2 \times 10^7$. 这种情况下不能形成准稳态的烟羽流。

(2) 受限空间近壁准稳态烟羽流, 对应 $Gr \geq 10^8$, 其横截面上温度分布近似于高斯分布, 垂直近壁面方向的温度分布是近似的截断高斯分布。

(3) 受限空间近壁准稳态烟羽流, 横截面上最高温升 ΔT_{max} 随高度 z 的变化关系可以采用公式(10)计算。

(4) 虚点源距烟源平面的位置按公式(11)估算, 与非受限烟羽流的估算公式基本相同。

由于受限空间烟羽流具有复杂的湍流结构, 且存在运动不稳定现象, 冷壁面和卷吸气流的影响具有非对称性, 顶蓬热气层的发展对烟羽流的性质也有影响, 因此研究其流场和温度场的结构及其变化规律, 尚且需要在理论和实验方面做大量的工作。

参考文献

- (1) D.J. Tritton, Physical fluid dynamics. 1977
- (2) 王致新、张源雪等, 宾馆客房火室模型及其实验验证, 消防科技, 1987
- (3) G. Cox and R. Chitty, A Study of Deterministic Properties of Unbounded Fire Plumes, 15th Inter. Sym. on Comb.
- (4) K. Kawagoe, Fire Behavior in Rooms. BRI Report No. 27 Building Research Institute, Tokyo, 1958
- (5) 建筑防火教材, 日本火灾协会编, 1980

Experimental Study on the Temperature Field of a Buoyant Plume

Zhang Renjie Yuan Liming Lou Jianyu

(The Graduate School of USTC, Beijing, KLFS of USTC, Hefei)

ABSTRACT

An experiment study of temperature distribution of quasi-steady state gas plume which is near the wall in bounded space, has been done. The experiment result shows that the temperature distribution on horizontal cross section approximate to Gaussens distribution. Relationship between maximum temperature on horizontal cross section and height from fire source approximate relationship of unbounded gas plume, but $c = 7.3$, $n = -1.62$. When Grashof number is below 2×10^7 , the gas plume must have instability.

Key Words: Plume, Bouyant