

稳定线性热分层环境下火灾烟气羽流 积分解及实验分析

方俊, 疏学明, 袁宏永, 郑昕

(中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 合肥 230026)

[摘要] 对稳定线性热分层环境下端浮力羽流无量纲积分方程首次采用数值解法进行求解, 得出浮力通量、动量通量等参量在轴线上的变化规律以及羽流中性浮力点的高度和羽流最大上升高度。2种不同尺度空间及不同烟气羽流出口条件的实验表明, 实际火灾烟气羽流最大上升高度与理论计算结果及文献经验公式相符, 从而表明积分模型数值解的有效性, 并为高大空间火灾烟气输运规律研究及探测技术发展提供了理论及实验依据。

[关键词] 稳定线性热分层环境; 火灾烟气羽流; 积分解; 实验分析

[中图分类号] TU998.12 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2004)01-0037-07

1 引言

高大空间如体育馆、飞机场、仓库等大型建筑具有空间高度大, 造价高, 人员分布密集的特点。由于空调设施或季节气候变化等原因, 容易造成其受限空间空气温度在高度上存在较大的差异, 呈现上高下低的情形。现实和实验证明, 此时火灾烟气由于高度上周围空气密度的变化有可能不能顺利上升, 从而致使现行的高大空间空气采样火灾报警系统失效, 给高大空间建筑人员和财产安全造成严重的威胁。随着高大建筑不断增多, 研究大空间内火灾烟气的发展趋势无疑具有极其重要的理论和现实意义。

假设某一空间空气温度上高下低, 存在一定的且稳定的温度梯度, 火灾烟气羽流为圆形羽流, 初始温度一般大大超过室内温度, 因此在热浮力作用下不断上升。在上升过程中, 由于浮力羽流的空气卷吸作用, 烟气密度沿程逐渐增大, 而周围环境空气密度逐渐减小, 造成烟气浮力沿程逐渐变小, 从而到一定高度, 羽流浮力为零, 称这个高度为中性浮力点高度。由于惯性作用, 烟气继续上升, 此时烟气密度大于空气密度, 致使浮力方向向下, 烟气

羽流最后终止在某一高度, 并最终形成向下及两边扩展的类似顶蓬射流稳定的扩展层, 扩展层最高点高度称为羽流最大高度(见图1)。

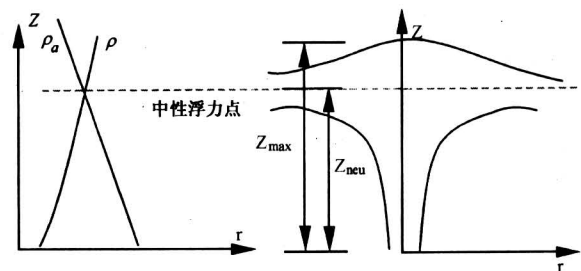


图1 稳定线性分层环境下浮力羽流示意图

Fig.1 Sketch of buoyant plume in a stably linearly stratified environment

图1中, Z 为浮力羽流竖直方向轴线坐标, r 为水平方向坐标, ρ_a 为羽流环境空气密度, ρ 为烟气羽流密度, Z_{neu} 为中性浮力点高度, Z_{max} 为羽流最大上升高度。

对于线性分层环境下浮力羽流的运动, 国内外一些相关文献已经做了较为详尽的论述, 但是这些文献研究对象大多为羽流在液相流体密度分层环境下的发展规律。少量研究类似火山爆发后火山灰羽

[收稿日期] 2003-07-14; 修回日期 2003-10-08

[基金项目] “九七三”国家重点基础研究发展规划资助项目(2001CB409608); 奥运科技专项资助项目(2001BA904B10)

[作者简介] 方俊(1972-), 男, 安徽桐城市人, 中国科学技术大学博士研究生

流之类的大型羽流在大气中的扩展规律也是采用液相流体进行相似模拟实验或量纲分析,进而获得一些经验公式^[1-4]。火灾烟气热物性参数与单纯液相流体有很大的不同,火灾烟气羽流大多为湍浮力热烟气羽流,与液相环境下的羽流运动有着很大的不同。

火灾烟气主要由以下3类物质组成具有较高温度的均匀混合物^[5],即:**a.**气相燃烧产物;**b.**未完全燃烧的液、固相分解物和冷凝物微小颗粒;**c.**未燃的可燃蒸气和卷吸混入的大量空气。其中固体颗粒平均粒径在1 μm左右,所以颗粒在烟气流动中跟随性很好。又由于烟气的热物性参数与干空气类似^[6],所以将火灾烟气视为热空气进行理论分析。作者首先从热分层环境下烟气羽流的控制方程出发,直接求其理论近似解,然后在线性热分层环境中实验归纳总结真实火灾烟气羽流的输运规律及相关关系式,进而与理论分析解及前人所得的经验公式进行对比分析,得出结论。

2 稳定线性热分层环境下羽流积分控制方程

2.1 自相似性及卷吸强度假设

线性热分层强度可以用 Brunt-Vaisälä 浮力频率参数来表示^[7]:

$$N = \left(-\frac{g}{\rho_{a0}} \frac{d\rho_a}{dZ} \right)^{1/2}. \quad (1)$$

式中 ρ_{a0} 为参考空气密度,取烟气羽流出口处空气密度的值。如果由于温度梯度造成空气密度分布不均匀,且空气密度在垂直方向呈线性梯度关系,则 N 为定值,定义此环境为稳定线性热分层环境。在均匀环境中, $N=0$ 。

根据 Turner 等人的分析结果^[7],均匀环境中的自相似性假设及卷吸假设在分层环境中仍然适用,因此在线性热分层环境中,圆形浮力羽流竖直向时均速度及周围空气密度与烟气羽流密度差在水平横截面上呈 Gaussian 分布,且羽流周围空气掺入强度与轴线流速成正比,即:

$$\begin{aligned} u &= u_m \exp \left[-\left(\frac{r}{r_c} \right)^2 \right], \\ \Delta\rho &= \Delta\rho_m \exp \left[-\left(\frac{r}{\lambda r_c} \right)^2 \right], \end{aligned} \quad (2)$$

式中 u 为羽流水平横截面上任一点竖向速度, $\Delta\rho$ 为该点周围空气与烟气羽流密度差, u_m 为该横截面羽流轴线竖向速度, $\Delta\rho_m$ 为轴线密度差, r 为该

点距轴线距离, r_c 为横截面竖向速度等于 u_m/e 处距轴线的距离,数 $e=2.718\ 28, \dots$, λ 为轴对称浮力羽流轴线方向密度差与速度宽度比值。Rouse^[8]等人(1952)在一个大实验空间点源轴对称热空气羽流实验中得到 λ 值为 1.16,此值也与 Rodi^[9](1982)湍浮力轴对称羽流掺混理论中所采用值相同,故文中取 λ 为 1.16。

羽流掺入强度与轴线流速成正比,即存在下列卷吸关系:

$$E = 2\pi\alpha r_e u_m. \quad (3)$$

式中 E 为空气掺入强度, α 为卷吸系数。根据 Rodi 的羽流掺混理论,轴对称羽流卷吸系数比纯射流卷吸系数大,为 $0.083\ 3 \pm 0.004\ 2$ ^[9],其平均值与 Turner(1986)对火山爆发大气卷吸理论分析中的采用值相同^[7],故文中取 α 为 0.083。

定义羽流的体积通量 Q ,动量通量 M 和浮力通量 B 分别为

$$\begin{aligned} Q &= \int_A u dA, \quad M = \int_A u^2 dA, \\ B &= \int_A \frac{\Delta\rho}{\rho_{a0}} g u dA. \end{aligned} \quad (4)$$

将 u 及 $\Delta\rho$ 的关系式及 $dA=2\pi r dr$ 代入上式积分可得

$$\begin{aligned} Q &= \pi u_m r_c^2, \quad M = \frac{\pi}{2} u_m^2 r_c^2, \\ B &= \frac{\pi \lambda^2}{1 + \lambda^2} u_m \frac{\Delta\rho_m}{\rho_{a0}} g r_c^2, \end{aligned} \quad (5)$$

式中 $g' = \frac{\Delta\rho_m}{\rho_{a0}} g$ 。

2.2 积分守恒方程

火灾烟气羽流为充分发展的湍流,因此在高雷诺数和大皮克勒特数情况下,可略去流体分子性质的影响,采用合理的 Boussinesq 假设,由热分层环境烟气浮力羽流质量、动量、组份守恒微分方程组可以推导出浮力羽流质量、动量、组份守恒积分方程组,进而可以得到^[10,11]

$$\begin{aligned} \frac{dQ}{dZ} &= 2\pi\alpha r_e u_m, \quad \frac{dM}{dZ} = \pi\lambda^2 r_c^2 g', \\ \frac{dB}{dZ} &= -QN^2. \end{aligned} \quad (6)$$

烟气浮力羽流假设为点源圆形羽流。当 $Z=0$ 时,线性环境对羽流影响很小,故采用均匀环境起始条件: $Q_0=M_0=0$,而初始浮力通量不为 0,设为 B_0 。

3 差分求解积分方程

3.1 无量纲法变换方程

在稳定线性热分层环境中， N 为常数，故可令羽流长度、动量通量、体积通量特征常数为

$$L_N = B_0^{1/4} N^{-3/4}, \quad M_N = B_0 N^{-1},$$

$$Q_N = B_0^{3/4} N^{-5/4}. \quad (7)$$

由此可以得到一组无量纲量：

$$z = Z/L_N, \quad m = M/M_N,$$

$$q = Q/Q_N, \quad b = B/B_0. \quad (8)$$

将上式代入式 (6) 及式 (5) 中，可以得到

$$\frac{dq}{dz} = 2\sqrt{2}\alpha\pi^{1/2}m^{1/2}, \quad (9)$$

$$\frac{dm}{dz} = \frac{1 + \lambda^2}{2} \frac{bq}{m}, \quad (10)$$

$$\frac{db}{dz} = -q, \quad (11)$$

初始条件变为 $z=0, m=q=0, b=1$ 。

由此可知，在稳定线性分层环境中，通过无量纲变换，羽流积分方程变为一组封闭的方程组。

3.2 差分求解及结果分析

对式 (9) 至式 (11) 常微分方程组进行差分求解，求解区间为 $[0, 4]$ ，求解精度为 $1e-6$ 。由求解结果知，当 $z > 3.9317$ 时， $b < -1$ 且得到复数值，这可以从 m 与 b 的关系式得到解释。

由式 (10)、式 (11) 消去 q 并结合 m, b 的初始条件可以得到 m 和 b 的关系式：

$$m^2 + \frac{1 + \lambda^2}{2} b^2 = \frac{1 + \lambda^2}{2}, \quad (12)$$

可见 b 绝对值应小于或等于 1，故须舍去 $b < -1$ 的值，实际实数可解区间为 $[0, 3.9317]$ 。

由式 (5) 及式 (7) 可得到无量纲轴线速度

$$\bar{u}_m = u_m / (B_0^{1/4} N^{1/4}) = 2m/q, \quad (13)$$

同理，可以得到无量纲浮力羽流相对浓度差

$$\Delta \bar{c}_m = \frac{\Delta \rho_m}{\rho_{a0}} / \left(\frac{1 + \lambda^2}{\lambda^2} B_0^{1/4} N^{5/4} \right) = b/q. \quad (14)$$

在均匀环境中，由于 $N = 0$ ，浮力通量为常数，类似上述差分求解可以得到各轴线参量在轴线上的发展关系。进一步假设动量通量与轴线高度成幂指数关系。由式 (5)、式 (6) 直接积分得出均匀环境下各参量在轴线上的发展关系：

$$M(Z) \propto Z^{4/3}, \quad u_m(Z) \propto Z^{-1/3},$$

$$\Delta c_m(Z) = \frac{\Delta \rho_m}{\rho_a} \propto Z^{-5/3}. \quad (15)$$

稳定线性热分层环境及均匀环境下烟羽数值求解得各参量在轴线上的发展关系如图 2 至图 5 所示。

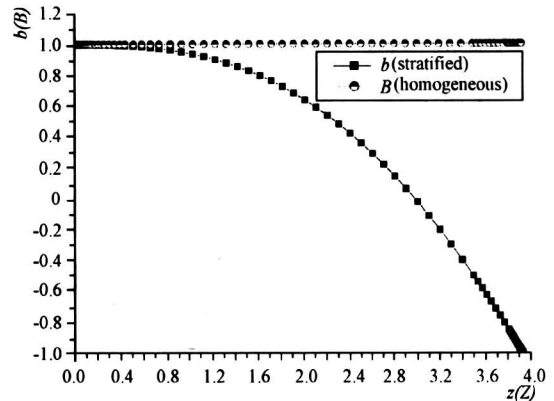


图 2 分层及均匀环境下浮力通量与轴线高度关系
Fig.2 Relationship between buoyant flux and height in stratified and homogeneous environments

由图 2 可知，在均匀环境中，烟气羽流浮力通量为一定值，而在线性热分层环境中，浮力通量随高度增加呈抛物线逐渐递减。当 $z = 2.9858$ 时， $b = 0$ ，表明此高度为中性浮力点的位置，随后浮力通量变为负值，表明浮力方向开始向下，直至 $z = 3.9317$ 时浮力通量达到最大负值，为 -1 。

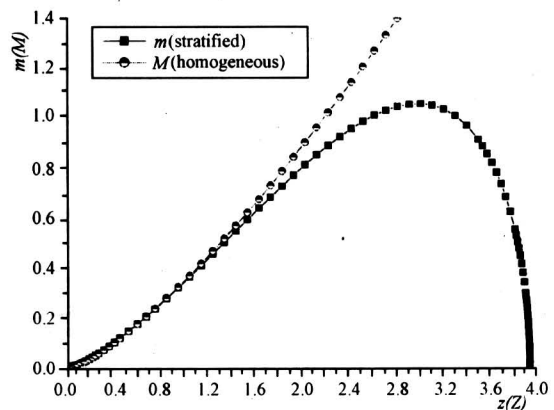


图 3 分层及均匀环境下动量通量与轴线高度关系
Fig.3 Relationship between momentum flux and height in stratified and homogeneous environments

由图 3 可知，在线性热分层环境中动量通量在 $z < 1.6$ 时类似均匀环境呈正指数增长，在 $z = 2.9858$ 即中性浮力点时达最大值，为 1.054 ，随后负浮力作用使动量通量迅速减小，至 $z =$

3.931 7时, $m = 0$, 表明浮力到达最高点。而在均匀环境中动量通量正指数增长趋势不变。

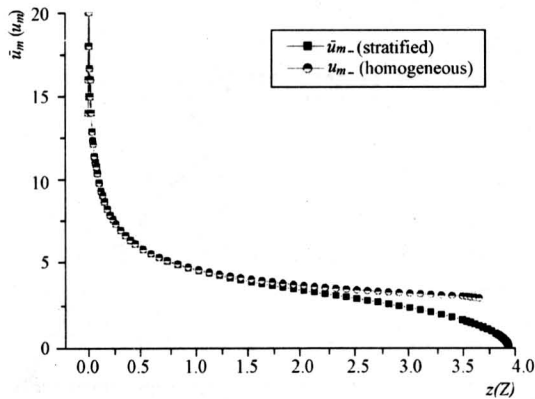


图4 分层及均匀环境下轴线速度与高度关系

Fig.4 Relationship between buoyant axial velocity and height in stratified and homogeneous environments

由图4可知, 在均匀环境中, 浮力羽流轴线速度呈负指数递减, 到达一定高度后, 速度渐趋于一稳定值。而在线性热分层环境中, 当 $z < 1.6$ 时, 轴线速度类似均匀环境下轴线速度递减, 在中性浮力点前减小较缓, 而在中性浮力点之后, 轴线速度减小趋势加快, 直至在 $z = 3.931 7$, 速度为0, 表明浮力不再上升。

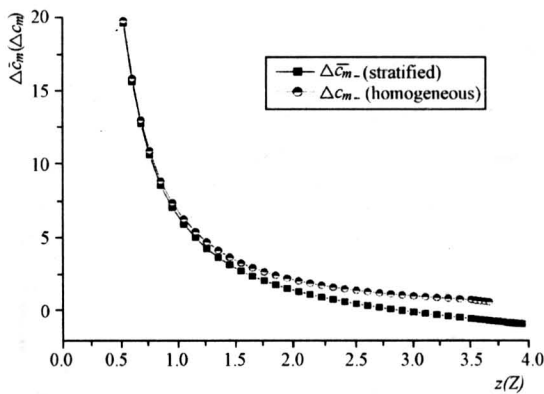


图5 分层及均匀环境下轴线密度差与高度关系

Fig.5 Relationship between axial density difference and height in stratified and homogeneous environments

由图5可知, 当 $z < 1.6$ 时, 在均匀环境及线性热分层环境中周围空气与浮力羽流密度差都存在负指数递减趋势。当 $z > 2.985 8$ 时, 在均匀环境中密度差最后趋于0, 即烟气被完全稀释直至密度与周围空气相同。而在分层环境中加速了这种递减

趋势, 密度差在某一确定高度即变为0, 随后密度差变为负值, 表明烟气密度超过空气密度。

由以上分析可知, 中性浮力点高度为

$$Z_{neu} = 2.989 B_0^{1/4} N^{-3/4}, \quad (16)$$

羽流最高点位置

$$Z_{max} = 3.931 7 B_0^{1/4} N^{-3/4}. \quad (17)$$

Turner 等人^[7,11,12] 实验得到羽流最高点经验常数为3.8, 故理论分析结果与该经验常数相当接近。

4 实验验证及分析

为实测线性热分层环境真实火灾烟气羽流的实际高度, 分别采用了中等尺度空间实验和全尺度大空间实验。中等尺度空间为长1.4 m、宽2.75 m、高7.5 m的5层模型楼, 如图6所示。大空间内部尺寸为长22.4 m、宽11.9 m、高27 m, 实验厅内部概貌及垂直方向自然温度分布如图7所示。



图6 中等尺度实验厅及实验装置

Fig.6 Middle-scale experimental room and equipment

采用阴燃棉绳发烟, 假定在烟气羽流圆形出口处烟气密度差为均匀分布, 由式(4)可知:

$$B_0 = \pi u_0 r_0^2 \frac{\rho_{a0} - \rho_0}{\rho_{a0}} g_0. \quad (18)$$

如前所述, 假设烟气热物性参数及相对分子量与空气相同, 在2种尺度实验中, 受限空间底部留有空隙, 因此可认为实验过程中大气压力保持不变, 设为标准大气压。

由于实验采用棉绳阴燃火, 由此带来的室内温度变化可以忽略不计, 故可由温度值直接查表和线



图 7 大空间实验厅内部概貌及垂向平均温度

Fig.7 Large-scale experimental room and the average vertical temperature

性内插求得烟气和空气的密度值。在实验中只需求得烟气羽流出口处速度、羽流半径、烟气与空气的温度以及空间高度上不同间距的空气温度，即可得到 B_0 与 N 值。温度测量采用直径为 0.2 mm 的稳定性及线性度较好的镍铬—镍硅热电偶丝，其时间常数近似为 10 s，一级测温范围为 0~800 °C，允许误差为 1 °C。烟气羽流出口速度采用双向测速管进行测量，其输出信号为压力信号。温度和速度平均值为热电偶及测速管瞬时信号在 3 min 以上的时间平均值。

4.1 中等尺度空间实验

如图 6 所示，中等尺度空间 5 层模型楼顶部采用 3 根平行石英加热管加热，加热管长度 70 cm，距顶蓬 0.3 m，在沿顶蓬中心垂直方向每隔 0.5 m 布置一个热电偶测量加热后垂直方向空气温度梯度变化，加热管功率由变压器控制。由于采用顶部加热，加热功率不大且受控，空气流动速度相对烟气羽流运动速度可以忽略。实验表明，当加热 10 min 左右后，室内温度梯度仅在 5 m 以上保持一个相对稳定的值，即在离顶蓬 2.5 m 垂直距离内有明显温度梯度，而在 2.5 m 以下室内温度几乎不变，因此顶部加热造成了局部分层环境。

当室内温度梯度稳定后，采用 30 根左右棉绳作为火灾烟气羽流发烟装置，置于底板中心，上面采用烟气罩，出口直径为 5 cm，烟气羽流产生后大约 2 min，由 CCD 观测烟气层所在标尺高度。在同样温度梯度下进行 5 次不同棉绳根数的实验，每

次实验间隔为 30 min，在两次实验的间隔时段，由抽风机将室内烟气排除并待空间环境稳定。羽流出口平均速度为 0.7~1.1 m/s，出口平均温度为 60~70 °C。

垂直方向各点空气温度示于图 8，采用查表^[6]和内插法得知相应空气密度值（见图 9）。由图 9 可知，空气密度在局部分层环境中大致呈线性递减趋势，故简化作线性处理。由计算结果知在均匀环境中烟气羽流浮力通量保持不变，所以在 5 m 高处局部分层环境羽流入口处浮力通量和烟气羽流初始处浮力通量相等，从而可以推算得 B_0 ， N 值。

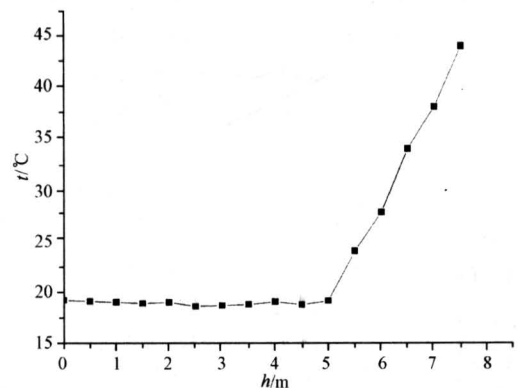


图 8 中尺度空间垂直方向不同点空气温度值

Fig.8 Different axial air temperature values in the medium-scale experimental room

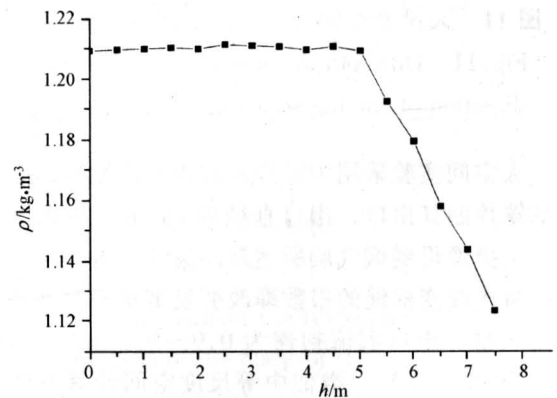


图 9 中尺度空间垂向不同点的空气密度值

Fig.9 Different air density values in axial direction of the medium-scale experimental room

4.2 全尺寸大空间实验

采用同样测温方法及计算方法可得大空间自然空气温度梯度及空气密度梯度，如图 10，图 11 所示。实验选择在外部无风环境下进行，并关闭所有窗户。

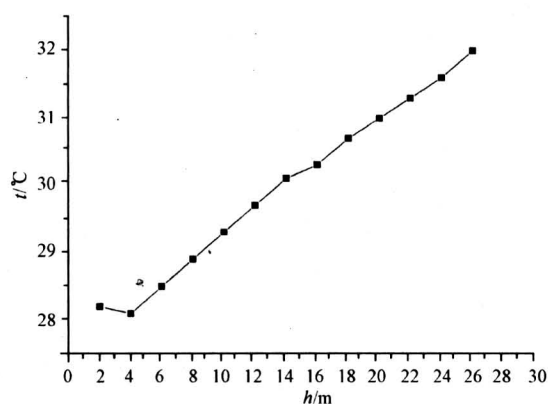


图 10 大尺度空间垂直方向不同点的空气温度值

Fig.10 Different axial air temperature values in the big-scale experimental room

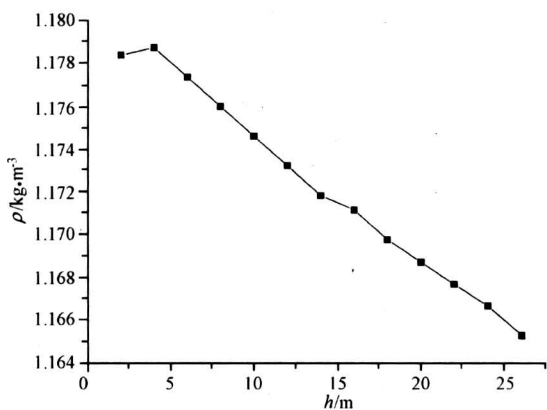


图 11 大尺度空间垂向不同点的空气密度值

Fig.11 Different air density values in axial direction of the big-scale experimental room

大空间实验采用 100 根左右棉绳阴燃放烟, 由集烟罩控制其出口, 出口直径为 20 cm, 根据室内标尺由摄像得到烟气层所达最高高度。进行 5 次实验, 每次改变棉绳的根数即改变发烟量来改变羽流浮力通量。出口羽流初速为 0.9~1.2 m/s, 出口温度为 65~74 °C, 类似中等尺度空间计算方法可得到烟气羽流出口浮力通量 B_0 及浮力频率 N 值。

4.3 实验结果分析

为寻求实际线性分层环境烟气羽流上升最大高度的规律并验证理论计算结果, 令最大高度系数

$$\bar{H} = Z_{\max(\text{实})}/B_0^{1/4}N^{-3/4}, \quad (19)$$

式中 $Z_{\max(\text{实})}$ 为实测烟气羽流最大上升高度, B_0 , N 值由前述实测相关参数计算而得。2 种不同尺度空间中不同次实验的羽流最大上升高度及最大高度系数列于表 1, 其中中等尺度空间 $Z_{\max(\text{实})}$ 值为局

部分层环境 (高 2.5 m) 羽流最高高度。

表 1 中尺度及大尺度空间烟气羽流最高点位置及系数值

Table 1 Maximum heights and height coefficients of different smoke plumes in medium-scale and big-scale experimental rooms

实验次数	中等尺度		大尺度	
	$Z_{\max(\text{实})}/\text{m}$	\bar{H}	$Z_{\max(\text{实})}/\text{m}$	\bar{H}
1	1.86	3.75	18.5	4.1
2	1.8	3.95	19.6	3.7
3	1.91	4.0	20.5	3.85
4	1.7	3.85	21.0	4.2
5	1.82	3.9	22.0	3.8

由表 1 可知, 大空间最大高度系数的波动范围较中等尺度空间的大, 这可能与大空间的密封性较中等尺度空间差有关。中等尺度空间最大高度系数平均在 3.89 左右, 大尺度空间实际系数平均为 3.93, 与理论分析值 3.931 7 及 Turner 等人实验经验系数值 3.8 相当吻合^[7,11,12], 表明经过诸多假设后, 积分控制方程差分求解仍与实际基本相符。实验发现大空间存在较大温度梯度时, 空气密度垂直方向分布线性度较好, 容易形成稳定线性热分层环境, 而初起火灾功率较小, 对分层环境影响不大。因此最大羽流上升高度公式可以推广应用于预测一定温度梯度环境下真实火灾烟雾的理论最大高度。

另一方面, 实测烟羽最大高度系数与前人实验经验常数基本一致, 表明采用盐水等液体进行的相似材料模拟实验所获得的羽流高度实验结果可适用于火灾烟羽的高度计算。

实验中没有观测羽流轴向速度、密度差等参数的变化及中性浮力点的位置, 因此, 理论计算得出的各参量沿程发展规律有待进一步证实。

由理论高度公式及实验结果可知, 较高的室内空气温度梯度及较小功率的火灾烟气势必降低受限空间尤其是大空间实际烟雾上升高度, 加上沿程空气稀释, 从而致使烟雾浓度在较低高度即变得相当稀薄。而现行大空间大多采用空气采样式火灾烟雾分析报警系统, 由于采用主动吸气装置使其布置高度不可能太低而不能及时发现烟雾, 可能导致火灾报警不及时, 因此大空间火灾报警控制系统尚待进一步改造提高。

5 结语

1) 通过对线性热分层环境火灾烟气羽流积分

控制方程组无量纲化并进行差分求解, 表明理论求解可以得到火灾烟气羽流各参量在轴线上的发展规律, 并获得烟气羽流中性浮力点位置及羽流最大上升高度公式。

2) 中等尺度及大尺度不同空间的真实火灾烟气浮力羽流实验, 表明线性热分层环境下烟气羽流存在最大上升高度, 该值与理论计算值及前人相似材料模拟所得经验参数值基本吻合。

3) 理论分析研究及观察实测结果为高大空间火灾烟气输运规律研究及探测技术发展提供了理论及实验依据。

参考文献

- [1] Tenner A R, Gebhart B. Laminar axisymmetric vertical jets in a stably stratified environment[J]. *Int J Heat Mass Transfer*, 1971, 14(11):2051~2062
- [2] Folkard A M. Laboratory observations of interactions of forced plumes with stratified shear layers[J]. *Fluid dynamics research*, 2000, 26(6):355~375
- [3] Auban O, et al. Simulation by solutal convection of a thermal plume in a confined stratified environment: application to displacement ventilation[J]. *Int J Heat Mass Transfer*, 2001, 44(24):4679~4691
- [4] Holasek R E. Experiments on gas-ash separation processes in volcanic umbrella plumes[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 1996, 70(3): 169~181
- [5] 范维澄, 王清安, 等. 火灾简明学教程[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1995
- [6] 杨世铭. 传热学(第二版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 1993
- [7] Turner J S. Turbulent entrainment: the development of the entrainment assumption, and its application to geophysical flows[J]. *J Fluid Mech*, 1986, 173:431~471
- [8] Rouse H, Yih C S, Humphreys H W. Gravitational convection from a boundary source[J]. *Tellus*, 1952, (4): 201~210
- [9] W·罗迪. 湍浮力射流与羽流[M]. 北京: 海洋出版社, 1991
- [10] Turner J S. Buoyancy Effects in Fluids[M]. London: Cambridge University Press, 1973
- [11] Fischer H B, et al. Mixing in Inland and Coastal Waters[M]. New York: Academic press, 1979.
- [12] Crawford T V, et al. Observations of buoyant plumes in calm stably stratified air[J]. *J App Met*, 1962, 1(2):251~256

Solution of Integral Equations and Experimental Analysis of Fire Smoke Plumes in Stably Linearly Thermally Stratified Environments

Fang Jun, Shu Xueming, Yuan Hongyong, Zheng Xin

(State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei, 230026, China)

[Abstract] Through numerical solution of the dimensionless integral equations of the turbulent buoyant plume in stably linearly thermally stratified environments, the transportation laws of the buoyant flux, momentum flux and other parameters in the axial direction as well as the neutral buoyant force height and the maximum plume height are obtained. Measurements on the different fire smoke plumes in the medium-scale and big-scale experimental rooms indicate that the actual values of the maximum plume heights are consistent with both the numerical calculation results and the empirical formula in the available literatures, thus this work validates the integral model and provides a good foundation for the smoke transport research and fire detection technology development in big space buildings.

[Key words] stably linearly thermally stratified environment; fire smoke plume; solution of integral equations; experimental analysis