

主支式排烟道中主烟道横截面尺寸的确定

黄 锐, 杨立中, 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] 高层住宅主支式排烟道的主烟道中烟气流动可看作是一维定常垂直摩擦管流。通过计算管流流动相与颗粒相的物理参数沿管程分布情况, 确定了颗粒相流动情况, 进而判断烟气排放情况。这受到排烟系统高度、烟道管径, 及材料组成等因素的影响, 通过预设排烟系统高度并保证良好排放情况, 求得主烟道管径应满足的条件。这使得布设排烟道时可以找到一个较好的横截面尺寸, 既满足烟气排放条件, 又节约修建材料。

[关键词] 多相流; 主支式厨房排烟道; 计算模型

1 引言

现代居民住宅中高层建筑逐渐增多, 出于环境卫生考虑, 厨房的废烟气需要从楼顶高空排放, 于是形成了主支式排烟道结构。其中主烟道的横截面积大小不仅影响烟气排放情况和建筑结构安排, 还影响着建筑材料的使用量。这里提出一种基于不同排烟初始条件的多相流计算方法, 以帮助确定高层建筑主烟道的横截面尺寸。住宅主支式厨房排烟道系统的抽象图见图 1 所示。其工作原理是, 烟气经抽油烟机从进烟口 3 进入支烟道 2, 然后沿着主支连通的支烟道通过出烟口再进入主烟道 1, 最后从主烟道由屋顶向大气中排出。

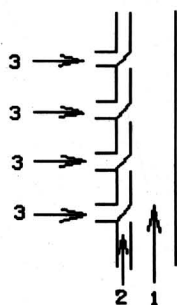


图 1 排烟系统示意图

Fig. 1 Schematic of some discharging system

对于非机械排烟的普通住宅厨房燃煤灶, 其排烟道一般用混凝土或轻骨料混凝土材料制成, 相应主支式排烟道主烟道的烟气流通截面积可通过下面的方法来确定^[1]:

当排烟系统的流通阻力

$$F_z = \sum_{i=1}^n \left(\lambda \frac{l_i}{d_{0i}} + S_i \right) \frac{u_i}{2} \rho \quad (1)$$

与燃煤产生烟气造成的自然升力

$$F_s = h_y g \left\{ \frac{1}{0.7734 + t_R/353.196} + \frac{1}{0.7463 + t_y/366.03} \right\} \quad (2)$$

$$\text{满足 } F_s \geq F_z \quad (3)$$

在此条件下的 d_{0i} 就是主烟道横截面的当量直径。但对于玻璃钢材料制成的主支式排烟道, 在通过抽油烟机机械排烟的情况下, 排烟过程的初始条件发生变化, 因而主烟道横截面积的确定方法应与上法不同。这既有利于节约建筑材料, 还有利于保证居民住宅环境的清洁卫生及人员、营具的安全。

2 一维定常摩擦管流的多相流模型

在此主支式厨房排烟道系统中, 对于主烟道, 可看作是截面为圆形的一维管道。在烟气排放过程

中作如下假定:

1) 流动是一维定常的, 即过程稳定, 沿管参数分布不随时间变化而改变。

2) 流动相与颗粒相之间有滑移, 即 $u_g \neq u_p$ 。

3) 考虑颗粒群而不考察单颗粒, 故不对颗粒尺寸分组。

4) 由于住宅厨房经抽油烟机和支烟道最后排入主烟道的烟气温度不是很高, 忽略颗粒相的相变化, 即质量源项 $S_m = 0$ 。

5) 如果住宅第一层厨房的烟气排放情况良好, 则其它层的烟气就不会在主烟道发生堵塞。因而主要考察第一层排烟情况。

6) 排烟过程的初始条件由抽油烟机的规格参数来确定: ρ_0 由抽排烟量确定, P_0 由抽油烟机风压确定, T_0 假设为 350 K。

2.1 流动相参数的沿程分布

这里流动相主要是空气, 对于一维管, 有如下一些气相控制方程:

气相连续方程:

$$\frac{d\rho_g}{\rho_g} + \frac{dv_g}{v_g} = 0 \tag{4}$$

气相动量方程:

$$\rho_g v_g dv_g + dP + \frac{\tau \pi D dx}{A} = 0 \tag{5}$$

气相能量方程:

$$v_g dv_g + C_p dT_g = 0 \tag{6}$$

气相状态方程:

$$\frac{dP}{P} = \frac{d\rho_g}{\rho_g} + \frac{dT_g}{T_g} \tag{7}$$

其中摩擦应力 τ 可用管流摩擦损失系数 ζ_s 来表示^[3]

$$\tau = \left(\frac{\xi_s}{4} \right) \left(\frac{\rho_g V_g^2}{2} \right) \tag{8}$$

式 (5) 又可写为

$$\rho_g v_g dv_g + dP + \xi_s \frac{\rho_g V_g^2}{2} \cdot \frac{dx}{D} = 0 \tag{9}$$

利用 (4)、(6)、(7)、(9) 式以及关系式 $C_p = \frac{\gamma \cdot R}{\gamma - 1}$, 可推导出如下关系式:

$$\left(\frac{\gamma \cdot P}{\rho_g v_g^2} - 1 \right) \frac{dv_g}{v_g} = \frac{\xi_s}{2} \cdot \frac{\gamma}{D} \cdot dx \tag{10}$$

由于马赫数 $Ma = \frac{u_g}{c}$ (这里的分母 c 代表声速), 所以由上面各式又可推导出

$$\left(\frac{1}{Ma^2} - 1 \right) \frac{dMa}{Ma} = \xi \left(\frac{\gamma}{2D} \right) \cdot dx \tag{11}$$

$$\left(1 - \frac{1}{Ma^2} - 1 \right) \frac{d\rho_g}{\rho_g} = \xi \left(\frac{\gamma}{2D} \right) \cdot dx \tag{12}$$

$$\left(1 - \frac{1}{Ma^2} - 1 \right) \cdot \frac{1}{(\gamma - 1) Ma^2} \cdot \frac{dT_g}{T_g} = \xi \left(\frac{\gamma}{2D} \right) \cdot dx \tag{13}$$

$$\left(\frac{1}{1 + (\gamma - 1) Ma^2} \right) \cdot \left(1 - \frac{1}{Ma^2} \right) \cdot \frac{dP_g}{P_g} = \xi \left(\frac{\gamma}{2D} \right) \cdot dx \tag{14}$$

由以上等式结合初始参数 ρ_0, T_0, P_0 就可算出气相状态参数 u_g, ρ_g, T_g, P_g 沿管长的分布。

2.2 颗粒相的运动速度参数 u_p 的沿程分布

当烟气颗粒在管内流动时, 除了受到气流曳引上升外, 还会与其它颗粒相碰撞、摩擦而消耗部分能量。在垂直管道内, 颗粒群还受颗粒自身重力的作用。因此颗粒群的加速主要是由空气曳引阻力, 管壁摩擦力及颗粒群重力相互作用的结果。当烟气自下而上运动时, 颗粒群重力起着使颗粒减速的作用。

对空气曳引阻力 (名为阻力, 实为牵引颗粒群上升的动力), 其表达式为^[2]

$$F_D = C_D A_{ps} \cdot \frac{\rho_g}{2} \cdot (u_g - u_p) \cdot |u_g - u_p| \tag{15}$$

其中颗粒群统计横截面积

$$A_{ps} = (1 - \alpha) \frac{\pi D^2}{4}$$

颗粒与管壁摩擦力^[2]:

$$F_f = \xi_s \cdot \frac{dx}{D} \cdot \frac{\rho_m u_p^2}{2} \cdot \frac{\pi D^2}{4} \tag{16}$$

式中 ρ_m 为悬浮状态下的颗粒群比重, $\rho_m = \frac{\rho_p q}{u_p}$
 $\frac{\pi D^2 u_g}{4 u_g} = \frac{4 \rho_p q}{\pi D^2 u_p}$, 其中 q 为体积流量, m^3/s

颗粒群的重力:

$$F_p = \frac{\rho \cdot q}{u} \cdot dx \cdot g \tag{17}$$

则在 dx 管长内颗粒群力平衡方程为

$$\frac{\rho_p q}{u_p} \cdot dx \cdot \frac{du_p}{dt} = C_D A_{ps} \cdot \frac{\rho_g}{2} \cdot (u_g - u_p) \cdot$$

$$|u_g - u_p| - \xi_s \frac{dx}{D} \cdot \frac{\rho_m u_p^2}{2} \cdot \frac{\pi D^2}{4} - \frac{\rho_p q}{u_p} \cdot dx \cdot g \quad (18)$$

利用此式可逐步求出 u_p 沿管程的分布。

3 基于模型的数值计算

对于本模型, 各相的物理参数均沿管长进行离散化。对于气相, 首先由式 (11) 积分, 得

$$-\frac{1}{4Ma^4} - \ln Ma + K = 0 \quad (19)$$

其中

$$K = \frac{1}{4Ma_0^4} + \ln Ma_0 - \xi \left(\frac{\gamma}{2D} \right) l$$

利用迭代法计算求解此方程, 得到对应于 l 处的 Ma 值, 于是根据式 (12), (13), (14) 及初始条件, 就能算出 ρ_g , T_g , P_g , 再由

$$Ma = \frac{u_g}{c} = \frac{u_g}{\sqrt{\gamma RT_g}}$$

得

$$u_g = Ma \cdot \sqrt{\gamma RT_g} \quad (20)$$

而式 (18) 又可化为

$$du_p = C_D A_{ps} \frac{\rho_g}{2\rho_p q} (u_g - u_p) \cdot |u_g - u_p| - \left[\xi_s \frac{u_p}{2D} + \frac{g}{u_p} \right] \cdot dx \quad (21)$$

将 u_g , ρ_g 值代入式 (21), 由式 (21) 算出 u_p 值。当 $u_p = 0$ 时, 说明此时颗粒群不再沿主烟道上升, 转而进入一个下降过程。这时就导致烟气在该处的堵塞而影响排烟道系统的工作。所以管径 D , 管长 h_y 应保证 $u_p > 0$ 。

4 结果分析

根据上述的计算方法, 可得出管径 D 变化时与管长 L (即排烟系统高度) 的关系。算例设计抽油烟机规格: 抽排烟量为 $28 \text{ m}^3/\text{min}$, 风压 $\geq 160 \text{ Pa}$, 计算关系曲线如图 2 所示。当系统高度逐渐增大时, 相应要求管径也随着扩大。在排烟系统高度 $0 \sim 20 \text{ m}$ 范围内, 管径变化速率不大, 但超出这个范围后, 就要求管径有较大的变化, 需要经过计算确定。因为在管壁厚度一定的情况下, 使用较小管

径就可以节约较多材料。

以上结论也可用理论说明, 从计算数据, 我们可以拟合出排烟道系统高度 h_y 与排烟道管径 D 的关系式为

$$h_y = 10.0971 + 47.1423D - 21.9754D^2$$

因此, 由 $\frac{dh_y}{dD} = 47.1423 - 43.9508 D > 0$,
($0 < D < 1 \text{ m}$)

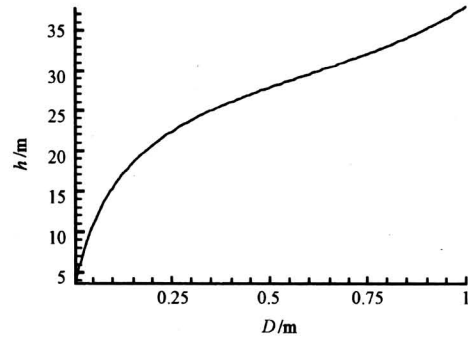


图 2 高度—管径曲线

Fig. 2 The dependence of height on diameter

可知管径 D 越大, h_y 可越高, 反之也成立。再根据 $\frac{d}{dD} \left(\frac{dh_y}{dD} \right) = \frac{d^2 h_y}{dD^2} = 43.9508 < 0$, 说明当管径 D 越大时, 排烟高度 h_y 对 D 的变化率越小; 反之, 当管径 D 较大时, 虽然排烟高度 h_y 变化不大, 但相应要求管径 D 的变化较大。这就是说, 此时管径稍有增加并不能使排烟高度显著增加, 而排烟高度的增加却要求管径有较大幅度的增大。

5 结论

由分别建立的气相控制方程与颗粒相控制方程, 通过计算机编程求解, 可以得到以下结论:

1) 烟气排放好坏主要在于排烟量及排烟工作效率, 认为当油烟到达排烟系统主烟道排烟口时垂直向上运动速度大于 0 时, 就达到了排烟目的;

2) 排烟系统主烟道横截面大小可决定排烟量多少与排烟效率的高低, 从这一角度说, 管径越大越好, 但考虑到材料使用的经济性, 应将两者综合起来, 选择较好的横截面尺寸参数;

3) 当排烟道系统高度和排烟量越大时, 相应要求主烟道横截面尺寸越大。但在系统高度不大的范围内, 对管径改变要求不是太高。

符 号 表

α ——气相容积分数, 即空隙度	ρ_0, T_0, P_0 ——抽油烟机排烟出口的热力学参数
a ——矩形流通截面长边, m	P_g ——流动相压强, Pa
A ——管截面积, m^2	ρ_p' ——颗粒相表观密度, kg/m^3
b ——矩形流通截面短边, m	ρ ——烟气密度, kg/m^3
C_D ——阻力系数	ρ_g ——流动相密度, kg/m^3
C_p ——等压热容	ρ_p ——颗粒相密度, kg/m^3
D, d_{0i} ——排烟道烟气流流通截面流速当量直径; 当流通截面为圆形时, $D=d$; 当流通截面为矩形时, $D=2ab/(a+b)$; 当流通截面为不规则形时, $D=4A/\text{管周线长度}$	λ ——沿程阻力系数
d ——圆形流通截面直径, m	R ——气体常数, $J/(kg \cdot K)$
F_s ——排烟的自然升力, Pa	s_i ——局部阻力系数
F_z ——排烟道系统阻力, Pa	t_R ——室外空气温度, $^{\circ}C$
γ ——等熵指数	t_y ——烟气平均温度, $^{\circ}C$
g ——重力加速度, m/s^2	T_g ——流动相温度, K
h_y ——排烟系统高度, m	u_i ——排烟道烟气流速, m/s
l_i ——排烟道分段长度, m	u_g, v_g ——流动相速度, m/s
	u_p ——颗粒相速度, m/s

参 考 文 献

- [1] 住宅厨房排烟道[S]. TG/T 3028—1995 学院出版社, 1987
- [2] 岑可法, 樊建人. 工程气固多相流动的理论及计算 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1990
- [3] 徐华舫. 空气动力学基础(下册)[M]. 北京: 北京航空
- [4] Walis G A. One-Dimensional Two-Phase Flows [M]. Mc. Gren-Hill, 1969

Calculation for the Cross Section Size of Flue Collector of Master-Slave mode Discharging System

Huang Rui, Yang Lizhong, Fan Weicheng
(State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

[Abstract] Flue collector of master-slave mode discharging system in domicile kitchen can be taken as one dimensional vertical steady flow with friction. By calculation of the distributional condition of the physical parameter of mobile phase and particle phase of flow, it can ascertain the flow condition of particle phase and further decide the discharging condition of fume. And it is affected by some conditions, such as highness of discharging system, diameter of flue and composition of material and so on. Through presetting the highness of discharging system and ensuring a well discharging condition, the diameter of master flue can be got to fit the condition. So a better size of cross section can be found for pipe laying, which both meets the discharging condition of fume and economizes the construction material.

[Key words] multiphase flow; master-slave mode discharging flue in kitchen; calculating model