

环境湍流作用下的烟云抬升数值模式

周颖 曹文俊 刘思涓

(贵州省气象研究所) (南京气象学院) (能源部电力环保所)

摘要 本文提出了一个在中性和稳定层结下,有风时热烟云抬升的数值模式,模式没有用 Boussinesq 假设和弯曲烟云假设(bent-over plume assumption),考虑了风对烟云的拖曳作用,认为环境湍流连续作用于烟云抬升的早期和后期。用哈密解法对模式进行数值求解后,对烟云内部各参数的分析表明,其变化过程是合理的,本模式的计算结果与实测烟云资料的比较分析也说明,在中性和稳定层结下,模式基本反映了烟云的运动规律。

关键词 数值模式,烟云抬升,环境湍流

在大气扩散理论和污染气象研究中,烟云抬升高度是一个重要的参数,烟云抬升高度不准确,可使模式的浓度结果产生成倍的偏差,因此对烟云抬升的研究具有重要意义。烟气抬升理论中,环境湍流对抬升的作用是一个研究得很不成熟的方面。不论是热烟云、动量烟云和混合烟云,都要经历一个重要的抬升阶段,即自生挟卷阶段,称为早期抬升。在这一阶段中,速度切变引起的自生湍流是导致烟气与周围空气混合的主要因子,环境湍流的影响较弱。当烟云继续抬升,进入后期抬升后,随着烟体不断增大,越来越多与烟云尺度相当的大气湍涡参与混合,环境湍流的作用明显增强,而自生挟卷则越来越弱。因此,在考虑挟卷关系式时,环境湍流的作用不可忽略。目前,对环境湍流作用的研究主要有以下几种理论:(1)分段作用模式⁽¹⁾; (2)突然作用模式⁽²⁾; (3)联合作用模式⁽³⁾。前两种理论在烟云抬升的早期没有考虑环境湍流的作用,后一种理论克服了这一不足,但其应用了 Boussinesq 假设(即除密度偏差项外,环境空气的密度等于烟气密度)和弯曲烟云假设(即烟云中心线速度近似等于平均风速⁽⁴⁾),而在某些情况下,这两个假设是失效的。

本文不用 Boussinesq 假设和弯曲烟云假设,考虑风对烟云的拖曳,在假定烟云剖面的物理性质服从帽状(top-hat)分布的情况下,得到各守恒方程。在建立挟卷关系式时,认

为环境湍流连续作用于烟云抬升各个阶段,于是提出了环境湍流连续作用的烟云抬升数值模式,用哈密解法对模式进行数值求解后,分析了烟云内部各参数的变化过程,并将中性和稳定层结下的计算结果与山西省神头发电厂1988年10月的实测资料作了比较分析。

1 模式的建立

1.1 守恒方程的建立

我们根据质量守恒、动量守恒和热能守恒原理,用微元分析法建立方程。首先假定:(1)大气的平均运动是水平均匀、定常的;(2)烟囱排出气体的运动是定常、轴对称和完全湍流的;(3)烟气的速度、密度等物理属性在同一剖面服从帽状分布;(4)风的拖曳引起的径向拖曳力 F_D 的经验函数 $F_D = c_d \cdot \frac{1}{2} \rho_a (u_a \sin \theta)^2 \cdot 2R(s)$, 式中 ρ_a 为环境大气密度, θ 为烟云轴线与水平线的夹角, u_a 为平均风速, c_d 为拖曳系数。

本文采用的坐标系如图1所示,图中 s 代表沿烟云轴线离开原点的距离, r 代表烟云法向截面中离开烟云的径向距离, V_c 为挟卷速度, θ 同上。坐标 (s, θ) 与直角坐标 (x, z) 之间满足下列关系

$$\frac{dx}{ds} = \cos \theta, \quad \frac{dz}{ds} = \sin \theta \quad (1)$$

根据文献[5], 我们可建立如下方程组

$$\begin{cases} \frac{d}{ds}(\rho_p R^2 u_p) = 2\rho_a R V_c \\ \frac{d}{ds}(\rho_p R^2 u_p^2) = 2\rho_a R V_c u_a \cos \theta - R^2(\rho_p - \rho_a) g \sin \theta \\ \frac{d\theta}{ds} = - \frac{2\rho_a R V_c u_a \sin \theta + R^2(\rho_p - \rho_a) g \cos \theta + \frac{c_d}{\pi} \rho_a R u_a^2 \sin^2 \theta}{\rho_p R^2 u_p^2} \\ \frac{d}{ds}[\rho_p R^2 u_p (T_p - T_a)] = - \rho_p R^2 u_p \sin \theta \frac{dT_a}{dz} \\ \frac{dx}{ds} = \cos \theta, \quad \frac{dz}{ds} = \sin \theta \\ \rho_p = \rho_a \frac{T_a}{T_p} \end{cases} \quad (2)$$

这里 T_a 为环境温度, T_p 为烟气平均温度, 其余符号同上。方程组中 $\rho_p, u_p, T_p, R, \theta, x, z$ 和 V_c 为未知量, 为使方程组闭合, 还需知道 V_c 的关系式。

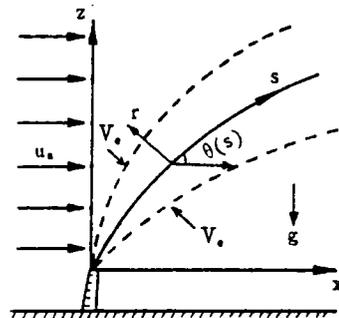


图1 模式采用的坐标系

1.2 挟卷速度的确定

关于挟卷速度 V_s , 至今无法从理论上确定, 而采用各种经验假设. 文献[3]认为环境湍流连续作用于烟云抬升的各个阶段, 尽管它在早期占次要地位, 但由于湍流混合的积累, 将导致烟体尺度、抬升速度和平均路径(弯曲烟云)逐渐偏离无环境湍流时的规律. 在此基础上, 他提出:

$$V_s = \beta u_p + \beta_T W' \quad (3)$$

式中 β 为自生挟卷系数, β_T 为环境湍流挟卷系数, W' 为环境湍流特征速度. chan 等(1972)认为自生挟卷率应包括切向和径向引起的挟卷率, 于是, 我们将(3)式改为

$$V_s = \beta u_s \sin\theta + \alpha |W^*| + \beta_T W'$$

$$\text{或} \quad V_s = N\alpha(u_p - u_s \cos\theta) + \beta u_s \sin\theta + \beta_T i u_s \quad (4)$$

其中 α 为自生挟卷系数, 本文取^(3,5) $\alpha=0.057$, $\beta=0.5$, $\beta_T/\beta=1.8$, W^* 为烟云中心线速度相对于大气的过剩值, $W^* = N(u_p - u_s \cos\theta)$, i 为环境湍流强度, $i = W'/u_s$. 由湍流强度定义, i 在 x, y, z 方向的分量可分别表示为

$$i_x = \frac{\sigma_x}{u} \quad i_y = \frac{\sigma_y}{u} \quad i_z = \frac{\sigma_z}{u} \quad (5)$$

式中 \bar{u} 为所论高度处的平均风速, 可根据风廓线规律而得, $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ 分别为 x, y, z 方向上的湍流速度标准差, 因直接得到其观测值较困难, 所以通常用参数化的方法求得. 在边界层以上的高度, 湍流很弱, 当烟云离地高度大于边界层高度后, 可认为湍流强度为零.

2 模式的验证

2.1 资料及数值解法

1988年9到10月, 能源部电力环保研究所在山西省神头发电厂作了现场综合测试. 神头发电厂位于东北—西南走向的雁北盆地北部, 拔海高度为1060m, 盆地在南北方向没有坡度, 东、西向坡度在千分之五以下, 电厂处于盆地中近山平原地区. 本文所用的神头烟云资料是用摄像机摄像后, 在数字图象分析仪上处理而得到的, 该方法已通过鉴定. 因为是20min连续录像后的平均值, 与国内激光雷达相比其时间平均值精度更高. 在测试烟云图象的同时, 有其他气象观测, 因而可保证稳定度类的可靠. 源参数如表1所示.

表1 源参数

项目	烟囱几何高度 $H_s(m)$	烟囱出口半径 $R_s(m)$	烟云出口温度 $T_{ps}(^{\circ}C)$	烟气出口流速 $w_s(m/s)$
参数值	210	3.5	62	15

我们用哈明解法对(2)、(4)、(5)式组成的方程组进行数值求解,哈明解法不需迭代,其速度快、数值稳定,且每一步均可估算误差,其解法是:用龙格-库塔方法由给定的初值和步长计算3步,而后用哈明方法积分⁽⁶⁾。

2.2 计算结果分析

2.2.1 烟云内部各参数在抬升中的变化

图2是计算所得的烟云平均密度 ρ_p 、烟云温度 T_p 及烟云平均升速 u_p 随下风距离的变化图。而环境空气密度、环境温度、环境风速分别为 $\rho_a=1.080\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、 $T_a=284.6\text{K}$ 、 $u_a=2.4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。由图看出,在下风距离400m范围内, ρ_p 迅速增长,随后逐渐接近环境空气密度。 T_p 迅速下降,渐渐趋于环境温度。 u_p 也随下风距离下降,在接近环境风速时,趋于定

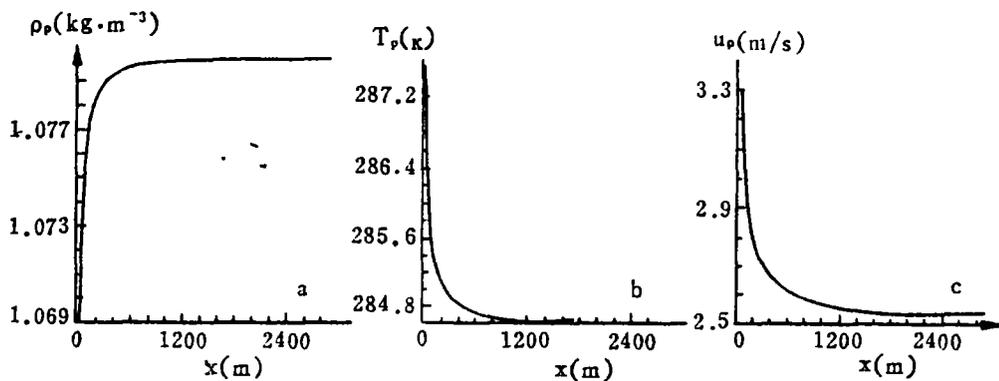


图2 a. ρ_p-x 的变化;b. T_p-x 的变化;c. u_p-x 的变化

值。这些现象可以从烟云的抬升过程中得到解释:当烟气自烟囱垂直向上喷出时,因自身的初始动量继续上升,烟气离开烟囱口后,浮力立即对抬升起作用。起初,烟气和周围空气温差大,浮力加速度亦大,此时烟体不断增大,烟云内部的温度和上升速度显著下降, ρ_p 随 T_p 下降而增大。随着自生湍流和环境湍流的作用,烟气与周围空气不断混合, T_p 趋于环境温度, ρ_p 近似于大气密度,同时,升速减慢,烟云逐渐变平。另外,从 ρ_p 和 u_p 的变化过程还可看到,在烟云抬升的初期, ρ_p 和大气密度是不相等的, ρ_p 从 $0.916\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 逐渐上升至 $1.068\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。 u_p 与平均风速也有差别, u_p 从 $15.0\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 下降至 $2.5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。这说明 Boussinesq 假设和弯曲烟云假设在烟云抬升初期即烟源附近的区域是失效的。

在忽略环境湍流作用的情况下,烟云半径 R 和它的抬升高度 z 成正比,即 $R=\beta_0 z$ ($\beta_0=0.5$)⁽⁷⁾。但从烟云的抬升过程可知,环境湍流的作用是不可忽视的,在环境湍流的作用下,烟气与周围空气的混合比不考虑环境湍流作用时更快,烟云增长更迅速。本文也计算了烟云半径 R 随高度 z 的变化(图略)。计算结果表明,考虑了环境湍流作用后的烟云半

径的增长速度,的确快于不计环境湍流作用时的烟云半径的增长速度。

2.2.2 与实测资料的比较

理论模式在什么程度上反映出烟云的实际行为,根本的检验标准在于与实测资料的

表2 误差分析表

时间	稳定度	样本数	\bar{k}	σ_k	\bar{r}
8:59	中性	10	1.07	0.14	0.10
10:48	中性	12	0.96	0.15	0.13
17:00	中性	11	1.20	0.37	0.27
6:52	稳定	21	0.95	0.24	0.20
16:52	稳定	11	1.07	0.33	0.23
17:52	稳定	13	1.10	0.25	0.22
18:02	稳定	12	1.30	0.49	0.42

比较。为了检验本文模式,我们对中性层结的3组资料及稳定层结的4组资料作了抬升高度的数值计算,计算中积分步长取为2m,并将数值计算结果与实际的抬升高度作了对比。表2是烟云抬升路径的计算值与实测值间的误差分析表。其中 \bar{k} 代表烟云抬升高度计算值与实测值的平均比值; σ_k 为平均比值的标准差; \bar{r} 为平均相对误差。由该表可见; \bar{k} 、 σ_k 和 \bar{r} 的数值都表明计算误差不大。作为例子,图3中绘出了计算的烟云抬升高度与实测值的比较,

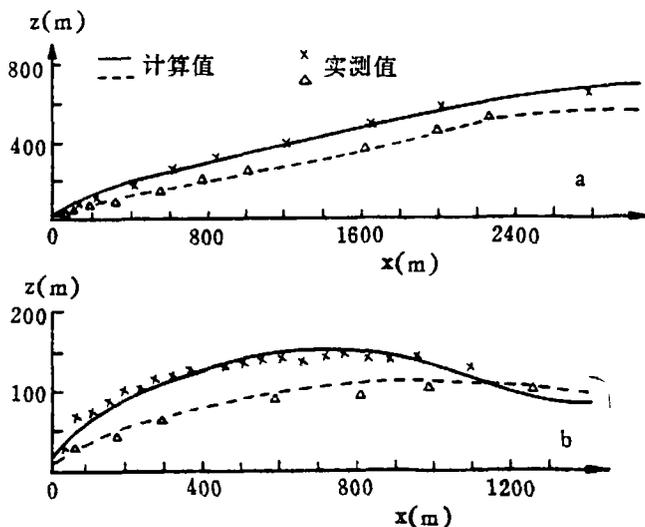


图3 烟云抬升高度计算值与实测值的比较

a. 中性层结时(实线为1988年10月2日08时59分,虚线为1988年10月3日17时)

b. 稳定层结时(实线为1988年10月2日06时52分,虚线为1988年10月5日18时02分)

其中中性层结的资料是表2中的8,59、17,00的资料,稳定层结时的资料是6,52和18,02的资料。图3表明,计算值与实测值是比较接近的。由2.2.1和2.2.2节的分析,可以认为在中性和稳定层结下,本文模式基本反映了烟云的运动规律,在实际应用中是可行的。

3 结论与讨论

本文在考虑环境湍流连续作用的情况下,建立了一个弯曲热烟云抬升的数值模式,并对模式进行了验证,最后得出以下几点结论:

a. 本文模式在中性和稳定层结下,能较好地反映烟云的运动规律,在实际应用中是可行的。

b. 烟云内部的温度和上升速度随抬升高度增加而迅速下降,烟云密度则随抬升高度增加而迅速变大,它们都逐渐趋于环境值。

c. 烟云半径随抬升高度的增长比线性增长快。

由于热烟云浮升的机理比较复杂,影响的因子也较多,因此,模式中还应包含有由观测资料或实验确定的系数如 α 、 β 、 β_r 等,而这里只是简单的引用别人的值。另外,由于本文是数值模拟,因此还存在一些问题,如对终极抬升问题未作讨论。今后需进一步研究烟云浮升过程中环境湍流与自生湍流联合作用的机理,以便使模式更完善。

参 考 文 献

- 1 Slawson P R, Coanady G T. *J Fluid Mech*, 1967; 28(2): 311-322
- 2 Haugen D A et al. *Lectures on air pollution and environmental impact analyses*. Boston: American Meteorological Society, 1975; 59-111
- 3 陈家宜. 气象学报, 1981; 39(1): 57-69
- 4 Davidson G A, Slawson P R. *Atmos Environ*, 1982; 16(2): 223-227
- 5 Davidson G A. *Atmos Environ*, 1986; 20(3): 471-478
- 6 上海机械学院, 安徽省计算中心编写. FORTRAN 应用程序库, 上海: 上海科学技术文献出版社, 1984; 114-135

A NUMERICAL MODEL FOR THE PLUME RISE UNDER THE ACTION OF AMBIENT TURBULENCE

Zhou Ying

(Meteorological research Institute, Guizhou Province)

Cao Wenjun

(Nanjing Institute of Meteorology)

Liu Simei

(Environment Protection Research Institute, Ministry of Energy)

Abstract In this paper, a numerical model is presented for predicting the buoyant plume rise with wind in the neutral and stable stratification. The Boussinesq approximation and the bent-over plume assumption are not used in the model. Instead, the drag of the wind on the plume is taken into consideration and it is assumed that the ambient turbulence has notable effects upon the path even in the early and late stages of rising. Finally, the numerical results are obtained by applying a Hamming procedure. Analysis indicates that the change of parameters within the plume is reasonable. It is found that the results from the model are in good agreement with the observational data in neutral and stable stratification.

Key words numerical model, plume rise, ambient turbulence

勘 误

本刊1991年第3期(增刊)452页第6行“热带对流层”与下一行“100hPa 等压”,因印刷错误上下行颠倒,特此更正。