

热烟云抬升的实验研究

马倩如 许敏第 王振声

(清华大学土木与环境工程系)

崔建祥

(中国环境科学研究院)

1981年10—11月, 1982年2—3月及5—6月, 我们在丹东市环保监测站的协作下, 于丹东市鸭绿江造纸厂(简称鸭纸厂)和化学纤维厂(简称化纤厂)进行了三次热烟云抬升的现场测试。两厂分别位于丹东市狭长市区的两端, 烟囱基本参数如表1。主要测定了烟囱下风向不同距离处的烟云抬升、有关烟气参数及气象参数。本文以此实验数据为依据, 在对文献模式进行验证和必要分析的基础上, 试图总结出适用于该地区不同大气稳定度下的抬升模式。

表1 烟囱主要参数

项 目	鸭纸厂	化纤厂
烟囱高度 (m)	45	45
烟囱口内直径 (m)	1.7	2.2
实验期间烟囱口最大排热率 (kcal/s)	800	1200

一、烟云抬升及有关参数的测定

1. 烟云抬升测定

实验采用照像法, 用普通相机拍照, 每次实验拍照20分钟, 每半分钟拍一张, 所得资料作为一组。整个实验共取得资料97组, 其中中性类56组, 不稳定类25组, 稳定类16组。将拍摄的烟云照片在放大机或缩微阅读机上放大画图, 据此图按一定比例可直接量得不同距离处的烟云抬升。每组资料的实测抬升

值是将同组照片的测定值按相同距离求平均得到。为避免较大的工作量, 在97组数据中分组随机抽样, 取出其中14组资料, 测定了相应下风向的烟云半径。

2. 烟气参数的测定

用热电偶分别测量烟囱顶部和底部烟温, 用毕托管测定烟气流速。由实验可知化纤厂烟囱顶部与底部的温差一般为2—3℃, 鸭纸厂一般约为10℃, 因此用底部的测定值代替顶部的测定值不致造成大的误差。

3. 气象参数测定

拍摄烟云照片的同时, 在距烟源约500米处用低空探空气球测定大气温度廓线, 探测高度为500—1000米。同时进行单点小球测风, 并用手提式风速仪测定烟囱顶的风向风速。地面风向风速由烟源附近的电接风向风速仪自动记录。

为了与大气扩散参数研究相一致, 大气稳定度采用修正了的Pasquill分类法, 并考虑烟云抬升的变化特点, 将其A、B、C类归并为不稳定类, E、F类作为稳定类, D类作为中性类。

4. 烟云抬升高度测定误差的分析

普通照像法测定烟云抬升高度的误差主要是由照像扭曲产生的。这种测量误差可用下述公式修正^[1]

$$\Delta h = (\Delta z + zG)/(1 - G)$$

式中 Δh 为修正后的抬升高度; Δz 为未修正

表 2 烟云抬升值的修正结果

实验时间	项 目	距 烟 囱 距 离 (m)									
		30	50	100	150	200	250	300	350	400	450
1982 年 3 月 8 日 6:06--6:26	未修正	41.7	48.4	58.3	56.3	54.6	50.2	49.2	52.3	64.9	67.0
	修正	41.4	47.8	57.0	54.5	52.2	47.4	46.0	48.4	59.7	61.0
	误差(%)	0.7	1.3	2.3	3.3	4.6	5.9	7.0	8.1	8.7	9.8
1982 年 3 月 8 日 10:01--10:20	未修正	29.3	38.5	58.2	69.3	78.1	82.0	107.4	112.7	113.2	137.9
	修正	29.5	39.0	59.5	71.7	81.6	86.6	114.6	121.5	123.4	151.9
	误差(%)	-0.7	-1.3	-2.2	-3.3	-4.3	-5.3	-6.3	-7.2	-8.3	-9.2
1982 年 3 月 9 日 10:06--10:25	未修正	13.2	18.3	29.0	41.2	51.9	68.4	90.9	104.8		
	修正	13.4	18.6	29.9	42.9	54.6	72.6	97.4	113.4		
	误差(%)	-1.5	-1.6	-3.0	-3.9	-4.9	-5.8	-6.7	-7.6		

的抬升高度; z 为照像机之上的烟云高度。

$$G = \frac{x \cdot \sin \beta}{M(\cos \beta + \sin \beta \cdot \operatorname{tg} \alpha)}$$

$$M = D \cdot \cos \alpha$$

D 为拍照点距烟囱的距离; x 为照片上测得的烟源下风向距离; β 为底片平面与烟云轴线的夹角; α 为拍照点和烟囱连线与照像机轴线的夹角。

本文利用具有一定代表性的三次实验的有关参数进行修正计算, 修正前后烟云抬升值的比较结果见表 2。

由表 2 可知, 修正前后的抬升值大多仅相差几米, 这对于由一批随机数据平均得到的抬升值来说, 是可以允许的。

二、抬升模式的建立

1. 文献模式的验证

用实测资料验证文献介绍的十多个模式, 以了解其适用性。验证指标如下:

$$\bar{K}; K_i \text{ 的平均值, } K_i = \frac{\Delta h_i (\text{计算})}{\Delta h_i (\text{实测})}$$

$\sigma_K / \bar{K}; K_i$ 的标准差 σ_K 与 $\bar{K}$ 之比, 验证结果见表 3。

2. 半理论模式

在忽略烟气初始动量的条件下, 可由烟

云质量、动量、浮力三守恒方程得到

中性条件

$$\Delta h = \left(\frac{3}{2K^2} \right)^{1/3} F^{1/3} u^{-1} x^{2/3}$$

稳定条件

$$\Delta h = \left(\frac{3F}{K^2 u s} \right)^{1/3} \left[1 - \cos \left(s \frac{x}{u} \right) \right]^{1/3}$$

式中 F 为热浮通量; u 为烟囱顶的风速; x 为烟源下风向距离; s 为稳定度参数, K 为夹卷系数。将我们得到的夹卷系数值 $K = 0.66$ 代入, 分别得到

$$\Delta h = 1.5 F^{1/3} u^{-1} x^{2/3} \quad (1)$$

$$\Delta h = 1.9 \left(\frac{F}{u s} \right)^{1/3} \left[1 - \cos \left(s \frac{x}{u} \right) \right]^{1/3} \quad (2)$$

$$\Delta h_{\max} = 2.4 \left(\frac{F}{u s} \right)^{1/3} \quad (3)$$

式(1)为中性条件下的半理论抬升路径模式, 式(2)、(3)分别为稳定条件下的路径模式和最大抬升模式。用浮力长度尺度 L 将(1)式无量纲化, 则有

$$\frac{\Delta h}{L} = 1.5 \left(\frac{x}{L} \right)^{2/3} \quad (4)$$

式中 $L = \frac{F}{u^3}$ 米。

若令 $r = sL^2 u^{-2}$, 可由(2)、(3)式得到

表 3 计算抬升值与实测抬升值的比较

公式名称	中 性		不 稳 定		稳 定		与实测吻合情况
	k	σ_k/k	$\bar{k}$	$\sigma_k/\bar{k}$	$\bar{k}$	$\sigma_k/\bar{k}$	
Bosanquet [3]	1.46	0.76	—	—	2.68	0.42	均偏高
Holland [4]	0.27	0.46	0.27	0.39	0.51	0.42	均偏低
陈家宜 [5]	2.0	1.45	1.05	0.93	—	—	中性偏高
CONCAWE [6]	0.86	0.40	0.76	0.36	—	—	均稍偏低
Lucas (1963) [7]	3.17	0.45	2.7	0.38	—	—	均偏高
Moses-Carson [8]	0.69	0.45	1.44	0.39	1.04	0.35	稳定条件适中
Csanady [9]	5.39	1.45	2.83	0.93	—	—	均偏高
Briggs [2]	1.12	0.45	0.95	0.41	—	—	不稳定条件适中
Briggs (稳定有风) [2]	—	—	—	—	1.95	0.27	偏高
国家标准式(城区)	0.73	0.45	0.62	0.39	—	—	均稍偏低
国家标准式(农村)	0.83	0.45	0.70	0.39	—	—	均稍偏低

$$\frac{\Delta h_{\max}}{L} = 2.4r^{-1/3} \quad (5)$$

表示中性和不稳定条件下 $\frac{\Delta h}{L}$ 与 $\frac{x}{L}$ 的关系。

$$\frac{x_{\max}}{L} = \pi r^{-1/2} \quad (6)$$

(2) 稳定条件

3. 实验数据的经验拟合

(1) 中性和不稳定条件

将式(4)写成如下形式

$$\frac{\Delta h}{L} = A \left(\frac{x}{L} \right)^B \quad (7)$$

利用中性条件下的 475 组, 不稳定条件下的 207 组实测数据进行回归计算, 得到

中性

$$\frac{\Delta h}{L} = 1.49 \left(\frac{x}{L} \right)^{0.67} \quad (\text{相关系数 } r = 0.89) \quad (8)$$

不稳定

$$\frac{\Delta h}{L} = 1.85 \left(\frac{x}{L} \right)^{0.65} \quad (\text{相关系数 } r = 0.93) \quad (9)$$

将回归式(8)与半理论式(4)加以比较, 发现两式完全吻合。若将(9)式中的幂指数值改取为 2/3, 则近似有

$$\frac{\Delta h}{L} = 1.8 \left(\frac{x}{L} \right)^{2/3}$$

即

$$\Delta h = 1.8 F^{1/3} u^{-1} x^{2/3} \quad (10)$$

此式与实测值配合同样好。图 1 和图 2 分别

若把由实测数据计算得到的 $\frac{\Delta h}{L}$ 与 $\frac{x}{L}$ 在

双对数坐标纸上点图(图 3), 发现所有点均很好的散布在一条直线附近。因此, 我们仍以式(7)的形式进行回归计算, 以得到路径方程。计算得到

$$\frac{\Delta h}{L} = 0.99 \left(\frac{x}{L} \right)^{0.59} \quad (\text{相关系数 } r = 0.71)$$

近似为

$$\Delta h = F^{0.40} u^{-1.20} x^{0.60} \quad (11)$$

可将此式作为稳定条件下的烟云路径方程。

如果以式(5)、(6)的形式, 利用由实测

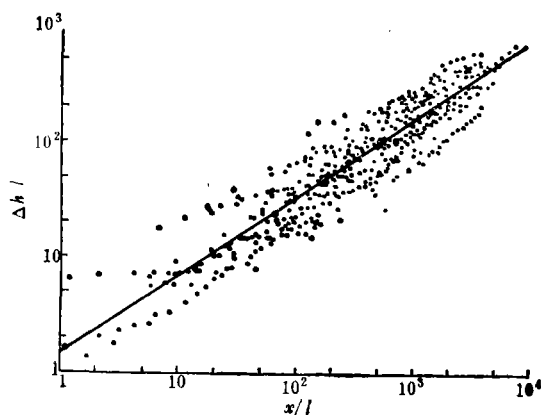


图 1 中性条件下无量纲抬升与无量纲距离的关系

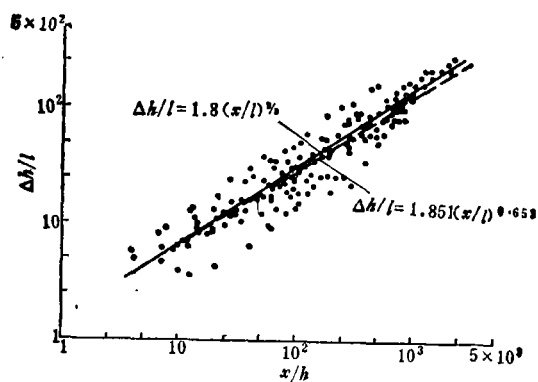


图2 不稳定条件下无量纲抬升与无量纲距离的关系

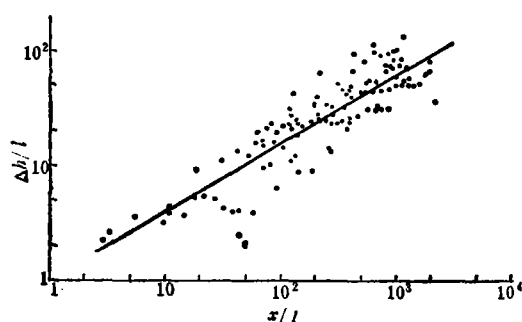


图3 稳定条件下无量纲抬升与无量纲距离的关系

数据得到的 $\frac{x_{\max}}{L}$ 、 $\frac{\Delta h_{\max}}{L}$ 和 r 值 (从 16 组资料中删去 2 组) 分别进行回归计算, 得

$$\frac{\Delta h_{\max}}{L} = 1.9r^{-0.29} \quad (\text{相关系数 } r = 0.83) \quad (12a)$$

$$\frac{x_{\max}}{L} = 6.1r^{-0.40} \quad (\text{相关系数 } r = 0.63) \quad (12b)$$

Bringfelt 曾用同样的方法分析收集到的数据, 得到如下关系^[10]

$$\frac{\Delta h_{\max}}{L} = 3.8r^{-0.28}$$

$$\frac{x_{\max}}{L} = 6.6r^{-0.41}$$

我们所得结果与此接近。

式 (12a)、(12b) 幂指数值若分别取理论值 $-1/3$ 和 $-1/2$, 则又得到

$$\frac{\Delta h_{\max}}{L} = 1.45r^{-1/3}$$

$$\frac{x_{\max}}{L} = 2.6r^{-1/2}$$

即有

$$\Delta h_{\max} = 1.45 \left(\frac{F}{u_s} \right)^{1/3} \quad (13)$$

$$x_{\max} = 2.6u_s^{-1/2} \quad (14)$$

由此看出, 式 (13) 要比半理论式 (5) 估算值约小 40%, 而式 (14) 比半理论式 (6) 估算值约小 20%。

4. 中性和不稳定条件下的最大抬升高度与最大抬升距离

若将中性和不稳定条件下的平均 F 值 ($F < 55$ 米⁴/秒³) 代入下式, 以计算最大抬升距离,

$$x_{\max} = 3.5x^* \quad (15)$$

式中 $x_{\max}$ 为最大抬升处距烟囱的距离, x^* 为抬升阶段向变平阶段转折之点距烟囱的距离。 $x^* = 14F^{5/8}$, 当 $F < 55$ 米⁴/秒³; $x^* = 34F^{2/5}$, 当 $F \geq 55$ 米⁴/秒³ 所得结果见表 4, 表中同时列出实测平均 $x_{\max}$ 值。将同一稳定度下的计算值与实测值比较, 发现两者很接近。因此, 可采用式 (15) 作为最大抬升距离式。

表4 计算与实测平均 $x_{\max}$ 值的比较

项 目 \ 稳定度	中 性	不 稳 定
式(15)计算平均(m)	386	373
实测平均(m)	420	376

于是, 得到中性与不稳定条件下的最大抬升式:

中性

$$\Delta h_{\max} = 1.5F^{1/3}u^{-1}(3.5x^*)^{2/3} \quad (16)$$

不稳定

$$\Delta h_{\max} = 1.8F^{1/3}u^{-1}(3.5x^*)^{2/3} \quad (17)$$

用式 (16)、(17)、(13) 计算的抬升值与实测值作了比较, 结果见表 5。可以看出, 模

表 5 本文模式计算抬升值与实测值的比较

比较指标 \ 公式	中 性 式(16)	不 稳 定 式(17)	稳 定 式(13)
$\bar{k}$	1.04	1.07	1.09
$\sigma_k/\bar{k}$	0.45	0.41	0.27

式计算值与实测值非常接近,且有较小的离散性。

三、结 论

1. 普通照像法测定烟云抬升是一种既简单易行,又有一定准确性的实验方法。

2. 由实测数据的对比发现,在本实验的烟囱条件下,烟囱出口处的温度可用底部温度代替,这样不致造成大的误差,且避免了高空作业的困难和危险性。

3. 实测结果表明,本次实验所得资料是可靠的,对此资料的分析结论与许多研究者比较一致或相当接近。

4. 本文推荐模式对于丹东地区是适用的,若要应用于其它地区,尚须实测验证。

参 考 文 献

- [1] Halitsky, J., *Int. J. Air and water poll.*, 4, 185—198 (1961).
- [2] Briggs, G. A., *Atmos. Environ.*, 6(7), 507—510 (1972).
- [3] Bosanquet, C. H. et al., *Proc. Inst. Mech. Engrs.*, 162, 355—365 (1950).
- [4] [美]斯莱德,气象学与原子能, 176—184页,原子能出版社, 1979年。
- [5] 陈家宜,气象学报, 39(1), 59—69(1981).
- [6] Brummage, K. G., *Atmos. Environ.*, 2(3), 197—224 (1968).
- [7] Lucas, D. H., et al., *Int. J. Air and wat. pollut.*, 7, 473—500 (1963).
- [8] Moses, H. and Carson, J. E., *J. Air pollut. Contr. Ass.*, 18(7), 454—457 (1968).
- [9] Csanady, G. T., *Int. J. Air and wat. pollut.*, 4, 47—51 (1961).
- [10] Bringfelt, B., *Atmos. Environ.*, 3(6), 609—623 (1969).

硫化法处理高砷污水的试验研究*

蒋 云 龙

(广西冶金研究所)

一、前 言

砷在矿石中作为一种杂质存在。随着矿物原料的开采利用,砷即以杂质元素进入各生产系统。由于低价砷氧化物的蒸气压很高,在有色金属焙烧冶炼及硫铁矿焙烧过程中,大部份砷经挥发进入烟气,部分以砷尘形式被收集,部分则在烟气湿式净化时进入洗涤水。近年来,许多生产厂为了减少有害污水的排放量,烟气净化逐渐趋于洗涤水的封闭或半封闭循环,使砷和其他污染物在洗涤

水中大大富集,每升污水中含砷量常达数千毫克,这就是高砷污水的主要发生源。

目前,国内对高砷污水的治理先例不多,采用的方法主要有石灰中和法或加入絮凝剂的中和絮凝法、氧化中和法以及硫化法等。为了给某冶炼厂高砷污水的治理提供合理工艺流程,我们利用湿法炼锑副产的低品位硫化钠作沉淀剂,先后进行了硫化法处理高砷污水的小型试验和 0.1 米³/时的连续扩大试验,

* 参加本试验的有冶金室污水组全体同志。