

过山气流对烟气干扰的水槽模拟实验研究*

张伯寅 刘可器 呼和敖德

(北京大学力学系)

(中国科学院力学研究所)

王道藩 曹新荃 崔新成

(湖南省气象研究所)

提 要

地处丘陵山区的湖南省某电厂, 由于受到复杂的山区气流场和气象条件的控制, 电厂烟囱排出的烟气, 受过山气流大涡旋运动流场的影响, 严重的污染大片农田及危害人体健康。本文通过利用分层流盐水槽所进行该电厂地形条件的模拟实验。详细的介绍了实验方法以及在中性与稳定层结条件下的流场特性和由于不同流场条件所造成烟气的运动规律。对不同的排烟高度所得到的不同烟气下沉距离进行了比较。从而提出了减少排烟污染的合理烟囱高度和位置。经与现场实测的结果对比, 取得了相当一致的结果。

一、引 言

解决丘陵地带工业区污染问题是相当复杂的, 首先必须对其流场特性和气象条件有足够的认识。本文所研究的内容是位于丘陵山区, 湖南省境内某发电厂对大气造成污染的一个典型事例。该厂的东南面紧靠着海拔 180 m 的丘陵山, 相对高差 110 m。南面山地起伏连绵, 最高山为 115 m, 其余为百米至数十米高低不等的丘陵。在高山与电厂之间有一个明显的深坑, 西南至西北为平坦农田。电厂座落于盆地南端山坡脚下 (图 1)。

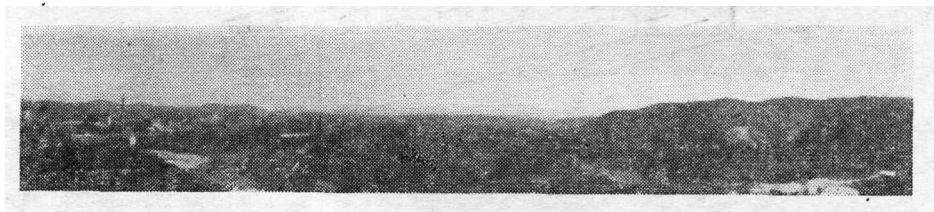


图 1 电厂实际地形照片

在气候条件上, 该地区属于亚热带季风气候, 年最多风频为偏北风。多半发生在秋冬季节, 次多风向为偏南风, 多半发生在庄稼成长的春夏季节。年平均风速为 2.7 m/s。最多风向与次多风向几乎与南面山脉垂直。每当春夏季节吹偏南风时期 (秋季次之), 由烟囱排放的含大量 SO_2 的烟气被迅速下压到地面, 严重地污染了下游大片良田。另一

* 本文于 1984 年 6 月 28 日收到, 1985 年 12 月 16 日收到最后修改稿。

方面, 由于该地区辐射逆温的作用, 烟气被抑制在近地面区域不易扩散, 更增加了污染的严重性。

为改善该地区环境条件, 合理选择烟囱高度和位置, 湖南省气象科研所对该地区气象条件和大气扩散情况进行了比较全面的实地观测, 取得了宝贵的第一手资料。为了弥补由于观测手段、技术措施和测试时间等方面所受的限制, 为了使得对复杂的地形条件所取得的实测结果更加完整, 对造成污染的各种流场条件进行系统的研究, 作者在配合现场观测的基础上开展了实验室模拟研究。

在实验室模拟工作中重点研究南风条件下主山背风面涡旋运动的流场对不同高度烟囱排放的烟气扩散的影响, 以及有温度层结条件下对扩散的影响。所得实验结果可为最佳烟囱高度和位置的选择提供依据。由于研究工作中的局限性, 文中没有考虑烟气热抬升的影响。实验是在密度分层拖曳式水槽中进行的, 取得了较好效果。也是现场观测与实验室模拟的一次有益配合。为了验证结果的可靠性, 我们将实验室所获得的结果与已得的部分现场资料进行了比较, 结果也是令人满意的。

二、实 验 方 法

1. 设备

本实验在拖曳式分层流水槽中完成。水槽长 6 m 宽 0.4 m 深 0.5 m。实验模型及显示装置均安装在拖车的拖板上, 拖车由电动机拖动。车速一般限于 40 cm/s 以内。图 2 为实验装置示意图。

水槽配备有自动充液系统, 可提供任意稳定分层的密度剖面, 用以模拟温度层结现

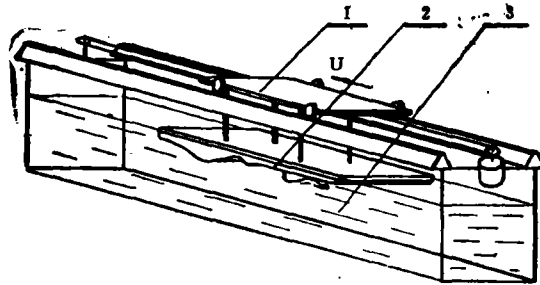


图 2 实验装置示意图
(1 拖车, 2 实验模型, 3 分层流水槽)

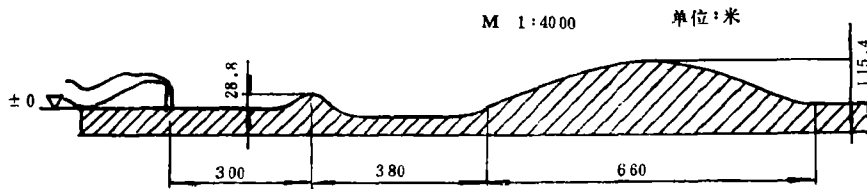


图 3 二维模型剖面图

象。

2. 模型

实验模型模拟了该发电厂所处的实际地形,做到几何相似。模型比例为 1:4000。根据电厂所处地理位置以及实际地形和风向的特点,为简化问题将该地区简化为二维问题处理。模型用木料制成,固定在有机玻璃板上,然后将其倒置固定于拖车上,这将减轻水表面波对流动造成的影响。图 3 为二维模型剖面图并附主要座标数据。

3. 实验方法

实验中采用流动显示技术可以直观而有效地得到各种复杂流场的物理图象。在本实验中使用了彩液示踪法。为显示气流过山流动,将一支排管置于主山的右面正前方。排管由直径为 1 mm 不锈钢管制作。彩液从排管中释放,在运动中可以显示流场形态。实验中要求彩液具有较好的跟随性,而且不易发散,以得到清晰的流谱。为模拟烟气的运动轨迹,从烟囱口释放出不同颜色的示踪液,根据相似准则从烟气出口速度与风速之比,确定了烟囱释放彩液量。

温度层结现象的模拟实验,是在盐水中用盐水造成的线性密度分布模拟线性温度分布。在分层流中,用彩液示踪法要求排管释放的彩液保持中性浮力,因此排管中彩液密度要与水槽中当地局部密度值相同。本实验只模拟了烟气出口速度比,没有模拟出口温度。

实验中采用每秒 3 张的连续自拍照相机拍摄,以及使用 35 mm 电影机记录,频率 15 张/s。根据连续拍摄的照片确定了涡旋运动周期和烟气下压周期。

三、相 似 准 则

实验中应满足几何相似、运动学相似和动力学相似。由于本文目的主要研究局部山区流场特性,因此可以忽略地转效应、热扩散和质量扩散等因素的影响,最后由动力学方程得到相似参数为:

$$\begin{aligned} \text{Re} &= UH/\nu && \text{雷诺数} \\ \text{Fr} &= U/\left(\frac{\Delta\rho H^2}{\rho D}g\right)^{\frac{1}{2}} && \text{弗劳德数} \end{aligned}$$

其中 U 为平均风速, H 为特征长(取主山高), $\Delta\rho$ 为大气在 D 层厚度的密度差, ρ 为平均密度值, g 为重力加速度, ν 为介质动粘性系数。

这是在实验中我们需要模拟的两个参数。根据实际大气运动,雷诺数一般为 10^7 — 10^{10} ,因此要在实验室模拟这样高的雷诺数很难实现,但是,根据已有文献资料说明,一旦流动达到湍流状态之后,即使模拟的雷诺数值达不到应有的大小,其结果与实际流动偏差不大。在本实验中,以山高为特征长则雷诺数约为 700—6000,若以板前缘到烟囱位置的长度计算雷诺数 Re_l 则为 10^4 — 10^5 。因此流动均为湍流状态。

在模拟大气运动时需要考虑大气所处的状态,由于大气的温度变化,大气具有稳定、不稳定和中性三种状态。

根据电厂地区现场观测资料,逆温层结对大气扩散抑制作用很强,因此实验中主要模

拟了大气中性稳定和稳定层结两种情况。在实验室模拟大气温度分布要求模拟弗劳德数,该数反应了惯性力与浮力之比。当 $Fr = \infty$, 相当于中性稳定的情况,即均匀流动。而相应的其余 Fr 数为稳定层结情况。

除上述参数之外,为研究烟气轨迹,要模拟烟气出口速度 w 与风速(拖车速度) u 之比值 w/u 。根据电厂烟囱出口速度和常年风速范围,确定速度比 $w/u = 0.091 - 1.82$ 。根据此模拟参数,当实验模型的烟囱直径 $d = 1 \text{ mm}$, 拖车速度 $u = 2 - 20 \text{ cm/s}$, 确定模型烟囱排放量 q 。

四、实验结果与分析

1. 中性稳定实验结果

在通常有风的天气,沿大气垂直的方向温度变化很小时,对此情况可以用均匀流实验模拟大气流动现象,这时 $Fr = \infty$ 。下面将不同雷诺数和速度比情况所得到的结果分析如下:

1) 流场特性

在吹偏南风时,气流越过山脉,贴近表面的气流在粘性阻力作用下,在山顶形成分离流动,并在下游卷起形成涡旋。涡旋的尺寸与山的特征尺度相当。从山顶脱落下来的大涡旋顺风不断向下游运动。在山背后逐渐形成一个很大的迴流区,同时又有新的涡从山顶脱落,在定常情况下涡的脱落有一定的周期。由于流动为湍流状态,因此涡旋在下游破碎形成索乱的湍流运动,随雷诺数增大,该现象更加加剧(见图4)。

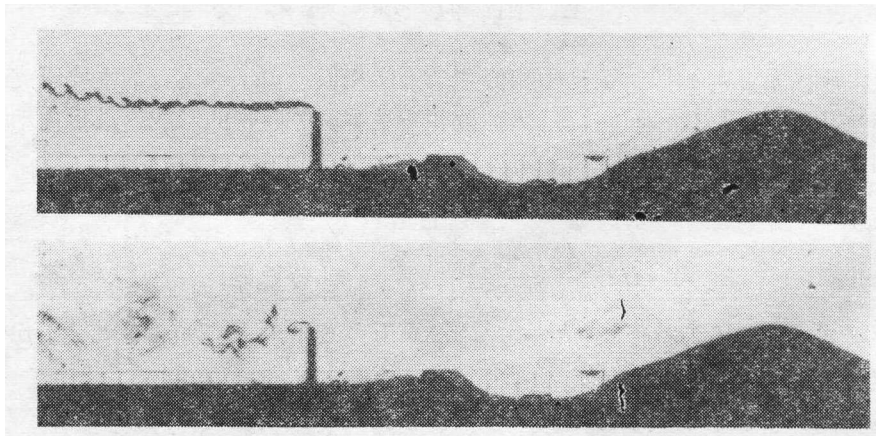


图4 流场中涡的形成和破碎
(烟囱高度120米, $Re = 1.6 \times 10^3$)

实验中测量了不同雷诺数情况下涡旋的尺度和迴流区的特征尺寸。由于大涡旋的湍流运动迴流区长度很难确定。这里只给出一个范围(见表1)。

结果表明,迴流区长度与雷诺数成反比变化,在本实验范围内迴流区长约为山高的12~18倍。高度范围比山要高,约为200m。现有电厂烟囱位置约为1000m(均从山中心算起),因此多数情况下从烟囱中排出的烟污是处于迴流区和涡旋区内。

表 1 迴流区与涡旋尺度

Rel	w/u	迴流区长(m)	迴流区高(m)	烟囱区涡尺度(m)
16000	5.95	1640—2000	224—270	160—190
18500	5.23	1600—2000	250—	190—
29800	3.19	1408—1840	200—262	160—240
43600	2.18	1567—	208—	185—213
62000	1.54	1466—	240—	130—240

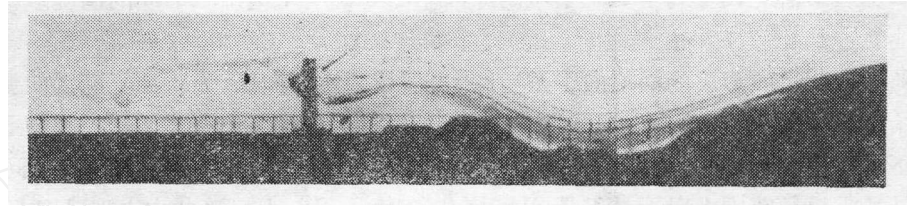


图 5 小山包对烟气下压的作用

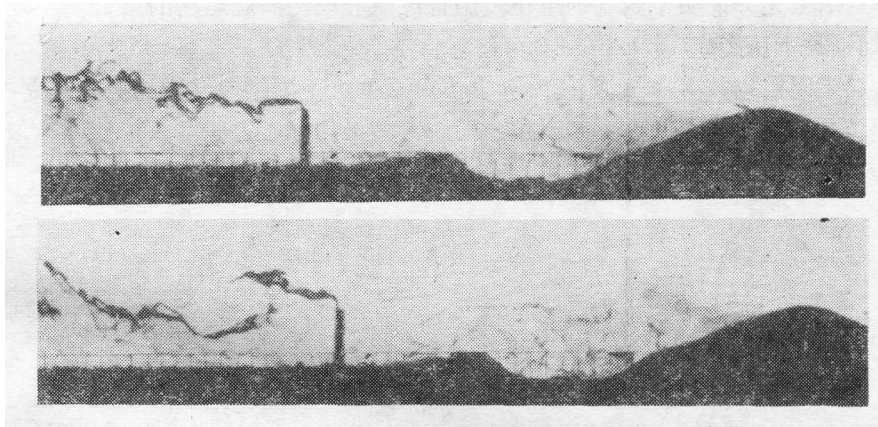
图 6 涡旋运动与烟气下压之间关系
(烟囱高度: 140 m, $Re = 2.98 \times 10^3$)

表 2 烟气下压位置

 $Fr = \infty$ 烟囱位置 $L = 1080$ m

Rel	w/u	烟气下压位置 L_{dw} (m)					
		烟囱高 h (m)					
		60	120	140	160	180	
16000	5.95	232—384	466—625	643—768	> 800	无明显下压	
18500	5.23	233—307	330—512	533—	> 780	无明显下压	
29800	3.19	200—432	300—540	350—543	> 740	无明显下压	
36000	2.36	286—	300—533	400—533	640	无明显下压	
59000	1.61	216—324	432—648	540—864	756	无明显下压	
62000	1.54	130—200	260—300	266—333	480	无明显下压	

根据实验结果我们可以清晰地看到, 主山和烟囱之间的小山包对烟气下压的作用(图 5), 由于小山的存在, 气流和涡旋被重新抬升, 而烟囱正处于被抬升气流和涡旋的控制之下, 因此这一作用相当于降低了烟囱的有效高度, 对烟气扩散不利。这一现象在实测中也发现了。

2) 流场与烟气被下压的关系

现场观测发现烟气每 3—5 分钟被下压至地面一次, 那么是什么因素迫使烟气下压呢? 这是我们需要研究的问题。本文通过研究各种不同雷诺数和烟囱高度的烟气下压情况和涡旋运动情况, 找到了烟气下压的原因。图 6 说明了主山脉形成的涡旋运动控制了烟气的轨迹。

随山脉背风面形成的涡旋向下游运动, 当涡旋到达烟囱区, 先将烟气顺涡的旋转方向向上抬起, 然后再压至地面。为了进一步证实这一点, 测量了山背风面涡脱落频率 St_v 和烟气下压频率 St_d 。其结果在各种不同雷诺数情况下得到的两个频率基本相同。在我们测量的雷诺数范围内以无量纲量 Strouhal 数表示, $S_i = H/tu$ (其中 t 为涡旋或烟气下压周期) 涡脱落的 $St_v = 0.209 - 0.29$, 对于 60 m 高的烟囱, 烟气下压频率 $St_d = 0.19_1 - 0.29$ 。这结果充分说明了烟气的下压是山背风面形成的涡旋运动的结果。

3) 烟气被下压距离

本文对不同雷诺数 Re_l , 速度比 w/u 和 60—180 m 不同烟囱高度的实验研究, 得到烟气下压距离和上述参数之间的关系(见表 2)。对结果作如下说明与分析。

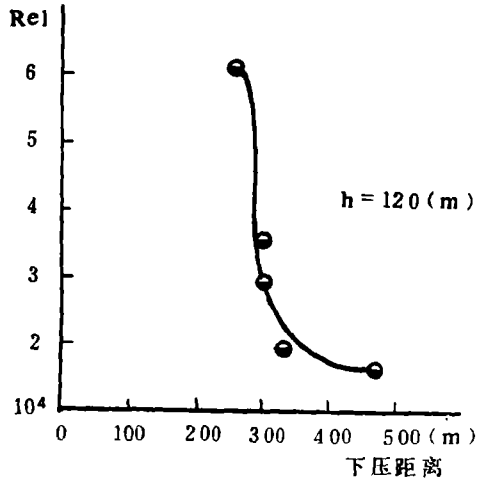


图 7 烟气被下压距离与 Re_l 关系

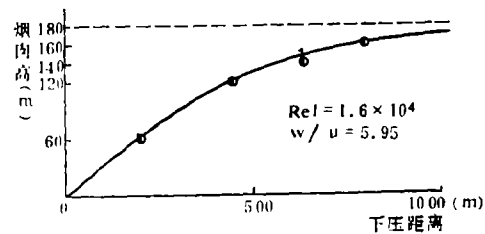


图 8 烟气下压距离与烟囱高度的关系

A. 烟气被下压距离与雷诺数关系

当雷诺数不很高时, 烟气下压距离随之增大而有所缩短(距烟囱的距离)。但当 Re_l 数增大到一定值之后, 由于强烈的湍流涡旋运动, 烟气的下压位置变化范围较大而且没有一个严格的确定值, 此时随雷诺数变化不明显(见图 7)。

B. 速度比 w/u 对烟气运动轨迹的影响。

对于大的烟气速度比, 烟气被抬升的高, 由于涡旋尺度大, 烟气仍被涡旋卷落在地面,

表 3 温度层结对烟气扩散的抑制范围

烟囱高(m)	$Fr=1.06$		$Re_l=11880$	$w/u=6.7$
	下压位置(m)	烟囱区涡高(m)	下游抑制高度(m)	
120	240—288	174—179		46—87
140	348—405	174—179		46—87
160	289—348	174—179		46—87
180	烟囱在涡区之外			

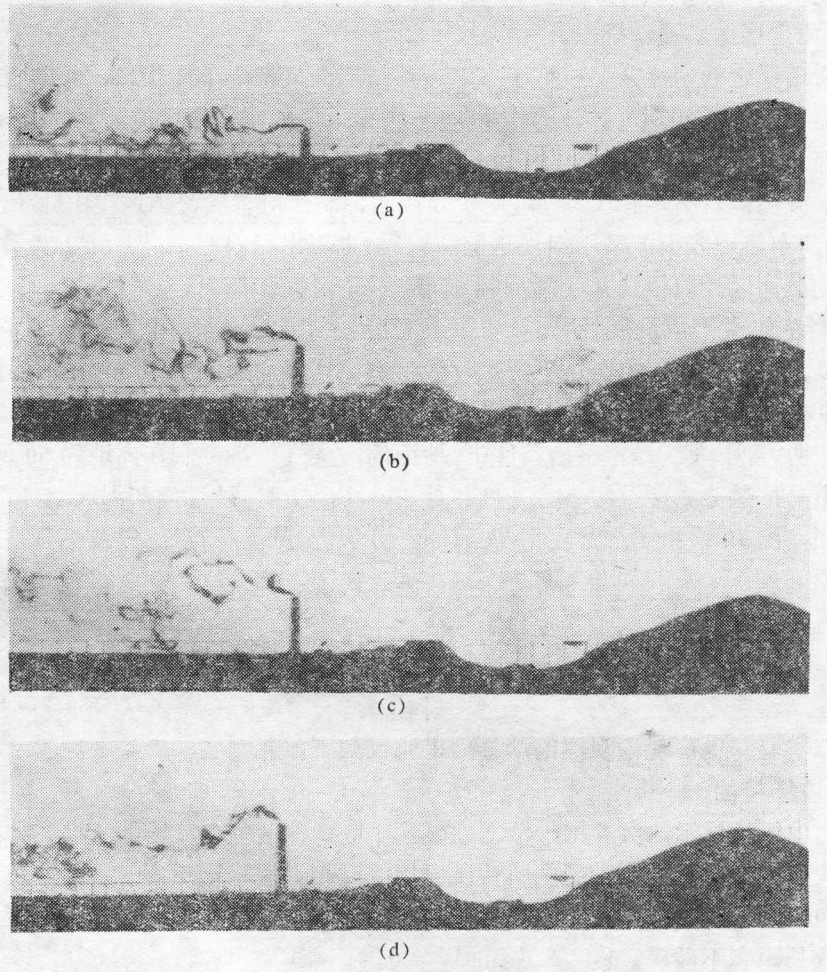


图 9 烟气下压地面的距离随烟囱高度的增加而变化
(烟囱高度(a)60 m, (b) 120 m, (c) 140 m, (d) 160 m, $Re = 2.98 \times 10^4$)

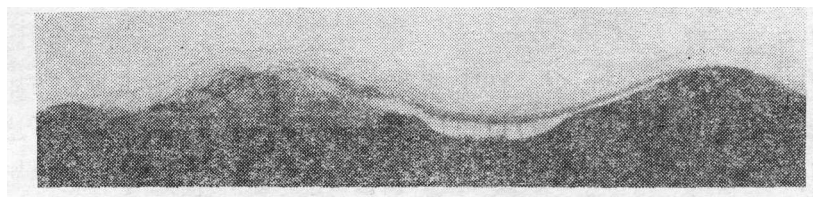


图 10 稳定层结条件下流场特性
(烟囱高度: 140 m, $Fr=1.06$ $Re_l=1.19 \times 10^4$)

因此速度比对下压位置的影响目前看并不十分明显,这还有待今后进一步研究。

C. 烟囱高度与烟气下压距离。

在较低雷诺数情况下,一般烟气不下压或在远下游下压。当 $Re_1 = 1.6 \times 10^4$ 除 180 m 高烟囱之外,其余仍有明显下压。下压距离随烟囱高度增加而向下推移(见图 8)。在大雷诺数情况下,180 m 高烟囱约在 900 m 下游处烟气出现下压。

从图 9 中可以看到,在相同条件下从烟囱中所释放的烟气下压至地面的距离,不同烟囱高度有明显的不同。

2. 稳定层结实验结果

本文用稳定的密度分层模拟了有温度层结的大气稳定平衡状态,并以此说明电厂区温度层结对气流场和烟气扩散的作用。本实验采用的密度梯度值为 0.0012 g/cm^4 线性密度剖面。相应的 Froude 数为 $1.06-1.74$, $Re_1 = 1.19 \times 10^4 - 1.9 \times 10^4$ 。

分层流实验表明,当 $Fr < 1.7$,由于分层的抑制作用,气流越过主山脉不出现分离现象,气流基本沿地表面流动不出现回流区,当然也不出现涡旋。当 $Fr = 1.7$,主山后坡上出现小的分离区。但很快又受到抑制未能形成回流区。然而,当气流流经第二小山包时,气流发生分离,并形成涡旋,涡旋尺寸约为 170 m。由于分层作用,涡旋运动被抑制在很小的范围以及较低的高度。在远下游烟气被抑制高度平均约 40—50 m,在烟囱区涡旋高度约为 170—180 m(见表 3)。

这表明,对于大气稳定平衡条件下,地面的污染气体被抑制在离地约 50 m 高度之内。使烟气不易扩散造成严重污染。高度超过 180 m 以上时,被排放在涡区之外,因此烟气不污染地面。图 10 给出了在稳定平衡条件下(分层流)的流场特性,以及烟气被压抑不易扩散的图象。

五、水槽模拟与现场观测的比较

模拟实验与电厂现场观测的部分结果比较如下:

1. 流场特性

水槽中流动显示的实验结果清晰地显示了电厂地区整个流场的流谱。结果表明,该地区在吹南风情况下主要受到主山背风面回流区和大涡旋运动的控制。回流区长约 1000—2000 m,高约 200—270 m。大涡旋垂直尺度约为 150—240 m。大涡顺风向下游运动保持较长距离不破碎。

现场实测发现,在下风水平方向 1500 m 以内,垂直方向约为 200 m 以下,存在着水平涡和垂直涡。这两结果基本一致。

2. 烟气下压位置

在吹南风情况下,对 60 m 高烟囱现场观测发现烟气以一定规律向地面下压,目测到烟气先被抬升,然后约在 200—500 m 内被下压至地面,水槽实验完全证实了这一现象,并发现是由于涡旋运动的作用造成的。实验得到不同雷诺数条件下烟气被下压距离,对 60 m 烟囱约为 130—430 m。结果与观测结果一致。

3. 烟气下压频率

根据相似准则,对两系统的时间量的模拟要求满足 Strouhal 数相等。对 60 m 高烟囱的水槽模拟实验,得到烟气下压频率 $St_{dw}=0.191-0.29$ 。

据现场 3 h 连续宏观观测结果,当风速为 2—4 m/s 时,烟气平均每 4 min 下压至地面一次,以山高 115 m 计算,实际烟气下压频率为: $St=0.125-0.25$ 。两者比较也是很一致的。

4. 温度层结对流动的抑制作用

电厂区气象观测资料发现有两条逆温强中心轴,它们分别为 30—40 m 和 100—120 m 高。烟雾主要被抑制在 30—40 m 带内。这就是当地逆温层结的作用。当逆温持续久时,污染物浓度增加,空气污染严重,危害最大。

水槽分层实验证明由于温度层结的作用使烟气和涡旋流动受到强烈抑制,在烟囱区上下游平均抑制高度约为 45 m,这与现场观测的 30—40 m 烟雾带相当一致。

上述对比说明,实验模拟与现场实测两个结果符合的较好。初步证明了水槽可以模拟大气中性和稳定层结的过山流动的流场特性,而且可以提供较满意的结果。

六、结 束 语

通过水槽模拟实验,可以对该电厂所处地形条件下所产生的旋涡流场有个全貌而又形象的了解。同时也获得了几组系列的定量结果。确定了电厂烟囱释放烟气所造成污染的主要原因是由于北面高山背风面旋涡运动影响的结果。当大气温度层结处于稳定平衡状态时,污染气体被抑制在 40—50 m 高范围内不易扩散,增加了污染的严重性。最后给出了选择厂址的最佳位置,其范围应于 2000 m 之外。而处于现有位置的烟囱,其最佳高度应加高到 180 m。本文利用水槽所进行的模拟实验与现场实测进行比较,取得了一致的结果。说明了实验方法可靠性。

现场实测、实验室模拟实验、数值模拟计算是进行环境评价或预评价的三个重要手段,为了弥补单一手段的局限性,并能进一步验证其可靠性,三者应互相配合、互相补充。本文所进行的实验室模拟实验研究,使我们对现场实测的结果与结论更加相信,反之现场实测对实验室模拟结果也提供了可贵的依据。在利用水槽模拟大气的初步尝试中,我们认为实验室模拟实验是非常经济的一种方法而且具有流场显示清晰的特点,特别是可以利用密度分层的方法实现稳定温度层结的大气条件,同时在大量的实验胶片的基础上取得了定性的或部分定量的结果。因此,利用分层流水槽模拟大气条件研究局部地区的流场现象是值得研究的一种方法。

参 考 文 献

- [1] 张伯寅、刘可器,在分层流体拖槽中烟云扩散的实验研究,气动力学杂志 4:56, 1982。
- [2] Huhe Aode, Yan Mingthan, Zhang Boyin, LiuKeqi, Experimental study of starting flow behind a triangular prism in uniform and stratified flow, proceedings of the second Asian Congress of Fluid Mechanics, 807—812, 1983.
- [3] 刘可器、张伯寅、呼和敖德,分层流实验研究中的装置和显示技术,力学与实践, 1, 42—46, 1985。

A LABORATORY SIMULATION OF THE LEE EDDY'S EFFECTS ON PLUME DIFFUSION

Zhang Boyin Liu Keqi

(Department of Mechanics, Peking University)

Huhe Aode

(Institute of Mechanics, Academia Sinica)

Wang Daofan Cao Xinquan Cui Xincheng

(Meteorological Research Institute of Hunan Province)

Abstract

Air pollution problems in hill-basin regions become increasingly urgent along with the development of industries in such areas. One of the salient features of the pollution problems of this kind is the significant effects of the lee eddies upon the dynamic behaviours of chimney plumes. In the present article, detailed descriptions of laboratory experiments conducted in a towing tank are given. Under neutral and stable stratification conditions, various lee eddy flow patterns and corresponding dynamic characteristics of plume movement were obtained in the laboratory simulations. Based on the experimental relationship between the plume-releasing high and the distance of plume's reattachment to the ground, criteria are proposed for chimney height designing and location choosing. Many of the laboratory measurements were compared with field data. The agreement seems quite satisfactory.

中国国家气候委员会在北京成立

中国国家气候委员会于2月5日在北京成立。国务委员、国家科委主任宋健同志代表国务院、国家科委到会祝贺，并作了“气候科学应指导经济建设”的讲话。

国家气候委员会是国家科委批准成立的一个非独立机构，挂靠在国家气象局。国家气候委员会由国家科委、国家计委、国家经委、国家气象局、中国科学院、国家教委、国家海洋局、水电部、国家环保局、农牧渔业部、林业部、地质矿产部、总参气象局等部门的35名领导和专家组成。国家气候委员会办公室设在国家气象局科教司。

国家气象局局长邹竞蒙担任国家气候委员会的首届主任委员。

国家气候委员会下设四个分委员会和一个专业委员会，即气候资料分委员会、气候研究分委员会、气候应用分委员会、气候影响分委员会和热带海洋和全球大气(TOGA)专业委员会。

国家气候委员会的职能是：编制我国的国家气候计划；负责组织协调国内各有关部门开展气候领域的研究、预报、服务和对外科技合作交流等方面的工作；还将承担国家交办的有关气候方面的咨询任务。

国家气候委员会的成立，为我国的国际交流和对外开放开辟新的窗口，疏通新的渠道，创造更多的交往机会。通过与国际组织建立密切联系，组织我国科学家积极参加国际合作，提高我国的科研水平，为全球尺度的气候学的研究和应用将做出应有的贡献。

王 远 忠