

加热法消雾所需热量和增温效应的计算方法*

申亿铭 陈吉航

(北京气象学院)

雾是人们熟知的一种常见的天气现象。它有利于农业生产和果树栽培，但对各种交通运输都会产生障碍和困难，严重时还可能发生意外事故；对于军事活动利弊兼有；在严重污染的城市中出现雾时，由于有毒的化合物，轻则发生中毒现象，重则出现居民死亡。所以雾对于国民经济、交通运输、军事活动乃至人类的生命健康都有直接和十分密切的关系。因此很早以来，人类就开始了人工消雾的试验，发展到今天，无论对消冷雾、还是消暖雾都有了比较成熟的实际可行的方法^[1]。但是从经济效益上来考虑，现代消雾多半是为了在雾天能使飞机起降而进行的，所以实际影响范围只限于飞机起降时所必需的机场跑道的有限地段而已。

1. 加热法消雾所需热量的计算方法

利用飞机发动机排热增加空气温度的方法消暖雾^[2]，必须首先知道为达到消雾目的所需的最低限度的热量，低于这个限度的耗热量不可能使雾消散，高于这个限额又会造成浪费，所以有必要提出加热法消雾所需热量的计算公式。

众所周知，雾是相对湿度达到 100% 时形成的一种天气现象，它应当满足

$$f = \frac{e}{E} 100\%$$

式中 f 为相对湿度， e 为实际水汽压， E 为饱和水汽压。上述公式表明，就是实际水汽压等于同温度下的饱和水汽压时才可能形成雾，因此要使雾消散就必须使 $E > e$ 。但我们知道，饱和水汽压是温度的单值函数，增大 E 值必然有一个相对应的温度值，反过来也是一样，提高温度值也必然有一个与其相对应的 E 值。因此计算消雾所需的热量就归结为：(1) 将雾中液态含水量完全汽化，并同时知道燃烧每克汽油所产生的水汽；(2) 找到此时的饱和水汽压及其对应的温度；(3) 求出雾的初始温度与饱和水汽压对应的温度之差；(4) 利用多元大气热力学公式求出所需的总热量，为此：

第一，必须确定消雾区的体积，并知道其中的含水量(即水汽密度)，以及使该体积内的液态水汽化为水汽所需的热量 Q_1 。

$$Q_1 = P \cdot R \cdot H \cdot G \cdot L$$

或
$$Q_1 = M \cdot G \cdot L \quad (1)$$

式中 P 为影响区段(飞机跑道)的长度， R 为跑道宽度， H 为雾层厚度， M 为影响区的空间体积，为了考虑与周围环境的交换，可适当增大范围，如增加 10%—20% 的系数， G 为液态含水量， L 为汽化潜热。

由此得到汽化后的水汽含量 W_1

$$W_1 = M \cdot G \quad (2)$$

第二，必须知道加热气体使 $E > e$ 时所需的热量。除了雾本身含有的水汽外，还要知道燃烧汽油所产生的水汽量。如令燃烧 1 克汽油产生 m 克水汽，又假如每次作业的耗油量为 n 克，则燃烧汽油产生的水汽量 W_2 应为：

* 本文于 1989 年 4 月 8 日收到，1990 年 9 月 24 日收到最后修改稿。

$$W_2 = n \cdot m \quad (3)$$

其中 n 和 W_1 都是通过试验, 利用逐步逼近的方法确定的。但是无论 W_1 , 还是 W_2 都是以单位体积内的水汽含量(即绝对湿度)来表示的, 为了计算或查表方便, 还需将它们换算为水汽压。为此, 我们引用下列关系式:

$$a = 220 \frac{e}{T} \quad (4)$$

将 W_1 和 W_2 都换算为水汽压, 则有:

$$e_2 = \frac{aT}{220} = \frac{W_1 + W_2}{220} T \quad (5)$$

式中 a 为绝对湿度, e_2 为水汽压以 hPa 表示。

如再加上雾中原有的水汽压 e_1 , 则此时实有水汽压应为:

$$e = e_1 + e_2 \quad (6)$$

显然, 此时的饱和水汽压已为 E_2 , 根据计算或查表就可查到与其相对应的 T_2 。但此时相对湿度仍为 100%, 空气仍处于饱和状态, 为了使雾消散仍需加热空气, 使其再提高一定温度, 假定其值为 Δt , 则其结果温度为:

$$T_3 = T_2 + \Delta t \quad (7)$$

由此我们即可找到消雾所需增温的数值为:

$$T_3 - T_1 = \Delta T \quad (8)$$

式中 T_1 为雾的初始温度。

然后利用多元大气热力学方程求出加热空气所需的热量 Q_2 :

$$Q_2 = C_v \Delta T \quad (9)$$

第三, 求出消雾所需的总热量 Q

$$Q = Q_1 + Q_2 \quad (10)$$

在实际作业时如知道燃烧每克汽油所产生的热量, 就可以确定所需要的汽油量了。

2. 增温效应的数值计算和分析

利用飞机发动机排热消雾已非被动点源, 而成为射流问题了。这种情况下的射流是通过飞机发动机射入静稳雾体中的高温气流, 其内部由于风速和温度分布的不均匀性, 也产生湍流, 所以可以用湍流扩散方程描述射流内部的温度分布。据此我们利用三维的湍流扩散方程的解析解计算了人工消雾结果的空间温度分布和增温效应。初始方程如下:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \kappa_x \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} \kappa_y \frac{\partial T}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \kappa_z \frac{\partial T}{\partial z}$$

式中 T 代表飞机发动机喷口的排热温度, u , v 和 w 代表 x , y 和 z 轴上的分风速, κ_x , κ_y 和 κ_z 分别为 x , y 和 z 轴方向上的湍流交换系数。

应用上述方程的解, 我们计算了 1987 年 12 月 14 日和 15 日两次消雾试验的温度分布。计算中采用的参数如下:

1) 参照著作[3]中的有关数据, 我们选用了 x 轴上的平均湍流系数 $\kappa_x = 14.17$ 和 $20 \text{ m}^2/\text{s}$ 三挡, 并相应地确定了 κ_y , κ_z 与 κ_x 的关系;

2) 每分钟的燃油量为 15 和 20 公斤, 每克汽油产生的热量为 $4.1868 \times 10^4 \text{ J}$;

3) 飞机发动机排热口离地面为 3m;

4) 发动机排热速度为 $521 \text{ m}^2/\text{s}$, 在 x 轴上 100 m 内的风速取自实测资料^[4], 而在此范围外为给定数据。

为了减少计算量,仅计算了 $y=0$ 的垂直截面的温度分布和 $Z=3\text{m}$ 水平截面的温度分布两种情况。为便于分析,将计算结果绘制成了图1、图2、图3和图4。分析这4张图,可看出如下规律:

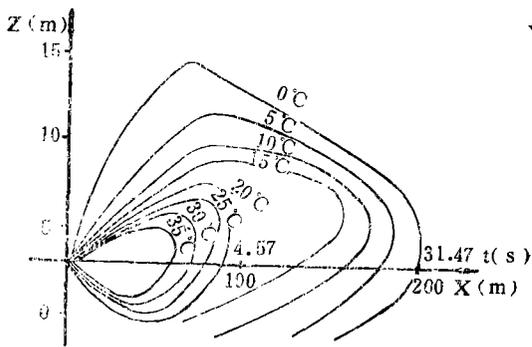


图1 增温包络垂直剖面图
(1987年12月14日,成都双流机场)

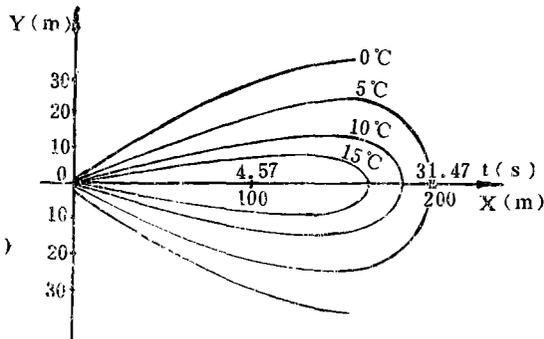


图2 增温包络水平剖面图
(1987年12月14日,成都双流机场)

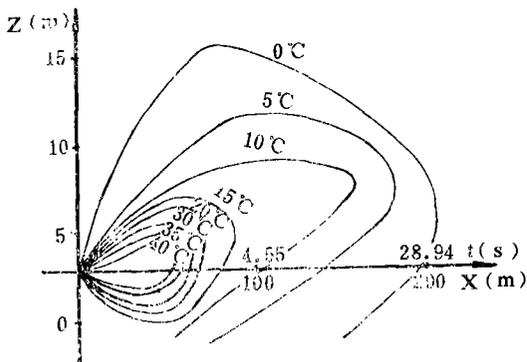


图3 增温包络垂直剖面图
(1987年12月15日,成都双流机场)

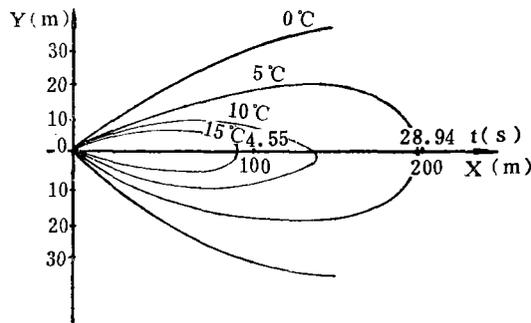


图4 增温包络水平剖面图
(1987年12月15日,成都双流机场)

第一,温度垂直分布的特点是:1)从总体上看增温曲线呈抛物型,但在上升速度的影响下呈向上的偏对称形式;2)增温数值随水平距离增大而逐渐减小,同时又以主轴线为界增温数值向上下两个方向减小;3)增温的水平距离达200m,而垂直范围仅在20m以内,这个数值与实际消雾高度略偏低一些。分析其原因,可能是由于没有考虑热浮升作用所致。对照1米高度上的实测温度(仅有此高度实测温度资料),其平均误差不超过 0.7°C 。

第二,温度水平分布的特点是:1)在高度为 $3\text{m}(z=h)$ 的横截平面上相对 $y=0$ 的轴线增温曲线呈对称型;2)增温数值以 $y=0$ 的轴线为界向左右两个方向逐渐减小;3)水平增温宽度在60m以上,与消雾宽度基本一致。

无论实验结果,还是理论计算资料都表明,利用飞机发动机排热消暖雾的方法是有效和可行的,而且具有相当的经济效益。

参 考 文 献

- [1] 王昂生等译,人工影响天气和气象,263—272,科学出版社,1985。
 [2] Appleman, H. S., and F. G. Jr. Coons, The use of jet aircraft engines to dissipate warm fog, *J. Appl. Meteor.*, 9, 6, 464—467, 1970。
 [3] Вцннценко, Н. К., Н. З. Пцнус, С. М. щметр и Г. Н. Щур, Турбулентность в свободной атмосфере, *Гидрометеоиздаг*, 121—122, 1976。

[4] 郭恩铭等, 人工影响暖雾的实验研究, *WMP Report* № 12, 2, 501, 1989.

PROBLEMS RELATED TO THE FOG DISSIPATION

Shen Yiming Chen Jihang
(*Beijing Institute of Meteorology*)

Abstract

In this paper, a brief description of the calculation method of heat required for fog dissipation by using heating technique is given. Based on the analytical solution of the equations of heat conduction, the spatial distribution of the temperature is calculated, and the theoretical analysis is made to explain the temperature-increasing effects.