

飞机积冰环境下的 液态水含量及滴谱个例分析

陈跃 马培民 游来光

(气象科学研究院)

提要

本文就1986—1987年冬季,国产Y-12型飞机在新疆地区进行飞机防、除冰试验期间所获得的资料,进行了个例分析,对影响飞机积冰的液态水含量、体积中值直径和滴谱等气象因素的水平分布进行了讨论。

一、引言

飞机积冰,对飞机安全飞行影响很大。据美国对1973—1977年的飞机事故统计,由飞机积冰引起的事故,占总事故的2.56%,占致命事故的4%。51.8%的飞机致命结构事故是由积冰引起的⁽¹⁾。1986年12月15日,兰州一架安-24飞机,由于飞机严重积冰,返航着陆时,造成6人遇难,飞机报废⁽²⁾。

从本世纪40年代末到50年代初,美国对飞机积冰的自然环境及其对飞机的影响,做了大量的探测和理论研究工作⁽³⁾。并制定了飞机自然积冰环境飞行标准⁽⁴⁾。要求飞机制造商在飞机设计、制造中,必须满足这个标准。其后,许多国家也制定了适合本国情况的条例。从70年代中期,首先,由于轻型多用途飞机的广泛使用(其巡航高度大多位于积冰高度内)和直升机越来越多地应用于积冰环境,其次,由于云微物理仪器的使用,以及提高积冰预报准确性的需求,人们又对自然积冰环境做了进一步研究⁽⁵⁾,还有许多试验计划有待实施。

Y-12(II)型飞机,是我国首次按国际适航标准设计制造的轻型多用途飞机,也是我国首次出口的民用飞机,要打入国际市场,必须取得相应国家的飞机积冰环境下的

适航证。为此,哈尔滨飞机制造公司委托我们对自然积冰环境下的大气状况,进行了探测和分析。

1986—1987年冬季,我们在新疆乌鲁木齐,对过冷层状云的微结构,进行了飞机探测。其中中等强度积冰5架次,积冰持续时间约5.6小时。取得了大量宝贵资料。这是我国首次飞机积冰环境的探测飞行。

飞机表面冰的形成及积冰率,不仅与飞机的速度,飞机的大小、形状有关,而且与过冷云的微结构,有着密切的关系。飞机本身和滴谱,决定了捕获效率,它与飞机在积冰环境中扫过的体积一起,决定了积冰量。空速和环境温度,决定是否积冰、积明冰还是凇冰。

本文分析1986年12月5日的一次探测结果,初步揭示云中含水量,滴谱和体积中值直径的特征。

二、仪器

在整个探测研究中,使用的是装有除、防冰系统的Y-12(II)型飞机。在机上装有特别为云物理研究设计的机载仪器,其中包括:三个美国PMS公司生产的滴谱探头,即前向散射滴谱探头(FSSP-100,测量直径范围:0.5—47 μm),二维云粒子图象谱探头(OAP-2D-C,测量范围:25—

300 μm)，二维降水粒子图象谱探头(OAP-2D-P，测量范围：200-6400 μm)。三个探头安装在机头前部。机上还装有一个国产DS-1返流管式温度探头及一个美国Rosmount公司生产的524K2型空速高度传感器。2D-C和2D-P用于测量云和降水粒子谱和粒子的二维图象。FSSP用于测量云滴谱。含水量(LWC)是由FSSP计算得到的。在飞机机翼未防冰部分及撑杆等处，装有标尺，以估计积冰厚度。

三、云的水平垂直分布

飞机探测是在层云和层积云中进行的。飞机采用爬高穿云后，在云顶上空做飞机性能试验，入云在LWC最大处平飞，达到预期积冰厚度后，出云顶做飞机性能试验，然后着陆的方式进行。1986年12月5日共飞行112分钟，其中积冰持续时间约为36分钟。飞机撑杆积冰约20mm，机翼结冰约15-25mm。

大多数冬季层状云是由大尺度上升气流形成的。云的微观特性在给定的高度上

变化不大。美国的观测(6)和我们的观测都说明了这点。云的水平变化见图1。图

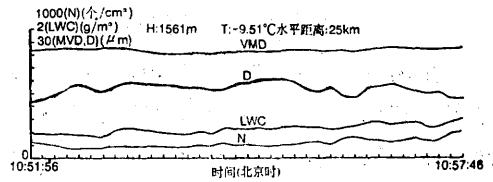


图1 云上部含水量最大区平飞情况

中的资料是在接近云顶，LWC最大处平飞得到的。平均高度(海拔高度)为1561m，平均环境温度为-9.91 $^{\circ}\text{C}$ ，平均粒子浓度(N)为108个/ cm^3 ，平均含水量(LWC)为0.44 g/m^3 ，平均体积中值直径(VMD)为25.05 μm ，水平距离约为25km。

云的垂直结构见图2。云厚550m。云顶伸入逆温层，根据云外飞行探测，逆温层顶在2650m，温度为0.2 $^{\circ}\text{C}$ ，逆温层厚约1150m。由于爬升速度过快，无法给出云内温度分布。从图2可以看出，由FSSP所测的含水量，从云底开始向上呈递增趋势，在近云顶处达到最大值，峰值含水量约为

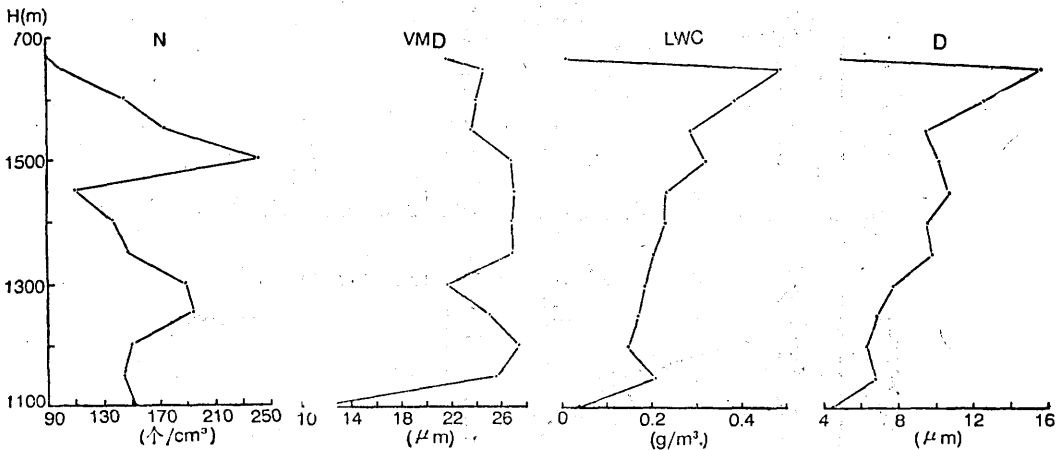


图2 云内气象参数的高度分布

0.5 g/m^3 。云滴浓度随高度没有系统的变化，但有一定的起伏，这种起伏对云内含水量和体积中值直径影响不大。平均直径(D)随高度增加而增大。由FSSP测得的体积中

值直径(VMD)，除个别点外，随高度略有递减，这与国外同类云的观测是一致的(7)。

图象资料表明，云内云粒子基本上是通过

冷滴，无雪晶。其中直径大于 $47\mu\text{m}$ 的云粒子很少，它们构成的含水量，小于 $0.01\text{g}/\text{m}^3$ 。

四、机翼的捕获效率和滴谱

在约36分钟的积冰飞行中，左机翼积冰厚度为 25mm ，右机翼积冰厚度为 15mm ，撑杆积冰厚度为 20mm 。平均LWC为 $0.16\text{g}/\text{m}^3$ ，VMD为 $21.9\mu\text{m}$ ，环境温度 T 为 -7.8°C 。由LWC、空速和飞行时间，得出飞机单位面积扫过的体积内的总过冷水量为 24346g 。由实测冰的密度 $0.8\text{g}/\text{cm}^3$ 和撑杆集冰厚度，得出实际单位面积总集冰量为 16000g 。两者的比值，即撑杆的捕获效率 E

为 0.66 。同理，机翼的捕获效率也在这个值上下。这与机翼的平均 E 值 $0.4-0.6$ 和淞冰的平均密度 $0.6\text{g}/\text{cm}^3$ 比较一致。

从图3滴谱的垂直分布可以看出，云的下部（ 1350m 以下），大部分滴谱在 $14-29\mu\text{m}$ 之间。有一浓度变化平缓区，含水量峰值在 $26\mu\text{m}$ 左右。直径小于 $5\mu\text{m}$ 的滴数占一半以上， $30-45\%$ 的含水量位于 $23-32\mu\text{m}$ 之间。在 1400m 以上，对应于云下部的云滴浓度平缓区，有一第二峰值，滴谱呈双峰型，第二峰值位于 $23\mu\text{m}$ 左右。 60% 左右的含水量位于 $23-32\mu\text{m}$ 之间。大滴的百分比随高度增加而增加，这说明云滴由云底向云顶增

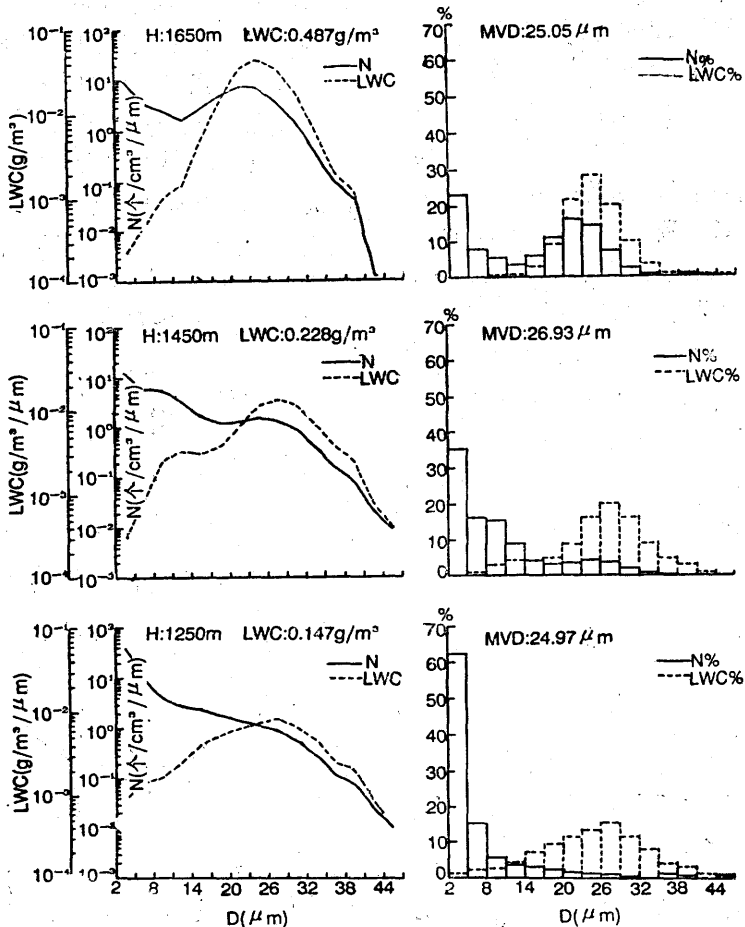
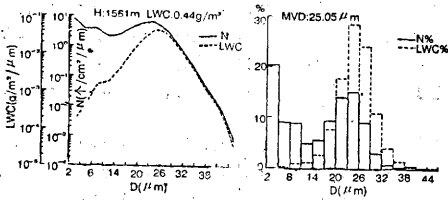


图3 云中滴谱的垂直分布

实线为滴谱及其百分谱，虚线为含水量谱及百分谱。每组资料是 50m 平均值

长。58%的滴谱谱宽为 $45\mu\text{m}$ 。

图4为水平飞行得到的平均谱，平均高



度为1651m，是由图1对应的谱平均而来。从图中可以看出，滴谱呈双峰型，第一峰值位于 $3.5\mu\text{m}$ ，第二峰值位于 $24.5\mu\text{m}$ 。平均谱是由36个谱平均得到的，它与36个谱的

谱型相差不大。平均谱80%的含水量是由20— $32\mu\text{m}$ 的滴构成。谱宽为 $45\mu\text{m}$ ，含水量谱为单峰，峰值位于 $23.5\mu\text{m}$ 。

五、谱函数

Khrgian-Mazin⁽⁹⁾的 Γ 谱形式

$$N(D) = N_0 D^2 e^{-AD}$$

$N(D)$ 为单位体积单位直径间隔下的云滴个数， D 为云滴直径， N_0 、 A 为系数。将上式从零到无穷大积分，则 $A = 3/D_m$ ， $N_0 = \frac{1}{2} \cdot N \cdot A^3$ ， D_m 为平均直径， N 为总的云滴个数。将K-M的 Γ 谱用于垂直分布的12个谱和一个平飞平均谱，结果见附表。从表中

附表 拟合谱特征值与实际值的比较

高度(m)	$N_0(\text{cm}^{-3} \cdot \mu\text{m}^{-3})$	$A(\mu\text{m}^{-1})$	LWC(g/m^3)		N($\text{个}/\text{cm}^3$)		VMD(μm)	
			实测	拟合	实测	拟合	实测	拟合
1097	20.88	0.695	3.45E-2	1.16E-2	152	105	11.49	8.15
1148	6.24	0.442	2.10E-1	5.22E-2	144	137	25.50	12.88
1200	8.22	0.180	0.149	4.22E-2	150	140	27.42	11.88
1252	8.19	0.440	0.173	7.09E-2	195	183	24.97	13.07
1306	5.63	0.390	0.185	0.100	189	183	21.55	14.60
1349	2.10	0.305	0.205	0.163	148	115	26.73	13.76
1396	2.13	0.315	0.232	0.136	137	133	26.68	18.10
1440	1.21	0.279	0.231	0.159	110	109	26.93	20.27
1499	3.11	0.295	0.320	0.294	243	238	26.67	19.22
1557	2.78	0.315	0.285	0.177	174	170	23.46	18.04
1593	0.98	0.240	0.385	0.313	145	141	23.83	22.37
1648	0.35	0.191	0.467	0.411	93	100	24.49	28.41
1561(平飞)	0.36	0.187	0.441	0.454	108	107	25.01	28.41

可以看出，拟合的云滴数与实测值相当接近，拟合的LWC值比实测值偏小，但在云中上部两者较为接近。拟合的VMD值大部分比实测值小得多，但在LWC大于 $0.4\text{g}/\text{m}^3$ 时，比实测值大。 A 值随高度增加而减小， N_0 波动变化。

对单峰谱而言，国外的某些资料表明⁽¹⁰⁾，在 $\text{LWC} \leq 0.2\text{g}/\text{m}^3$ 时，由K-M谱计算的LWC、N、及VMD与实测值拟合得相当好。在 $\text{LWC} > 0.2\text{g}/\text{m}^3$ 时，拟合的结果偏大，认为部分是由于拟合谱中较大的云

滴偏多造成的。作者认为，对这次个例而言，由于实测谱在 $14-26\mu\text{m}$ 之间变化平缓或有第二峰值，则与 Γ 谱的单峰性存有差异，用 Γ 谱来拟合，不能反映出这一段的云滴对含水量的贡献。所以，造成拟合的含水量和VMD值比实测的要小。但在 $\text{LWC} > 0.4\text{g}/\text{m}^3$ 时，又由于实测谱在第二峰值后减小很快，结果拟合谱中的这部分大滴比实测值大，进而使VMD值大于实测值。

六、结 语

1. 云上部有一强逆温层，云顶伸入逆

温层中。

2. LWC随高度的增加而增加, 最大值在云顶附近, 约 $0.5\text{g}/\text{m}^3$ 。

3. 除个别点外, VMD随高度略有递减。

4. N随高度没有系统变化, 且对LWC, VMD值影响不大。

5. 云滴由云底向云顶增长。

6. 在给定的高度上, LWC, N, VMD的水平分布均匀。

7. 直径大于 $47\mu\text{m}$ 的云滴构成的含水量小于 $0.01\text{g}/\text{m}^3$ 。

8. 云中下部, 大部分云滴谱在 $14-26\mu\text{m}$ 之间有一浓度变化平缓区, 含水量峰值在 $26\mu\text{m}$ 左右。直径小于 $5\mu\text{m}$ 的滴占一半以上, $30-45\%$ 的含水量位于 $23-32\mu\text{m}$ 。云中上部, 云滴谱为双峰型, 第二峰值位于 $23\mu\text{m}$ 左右。 60% 左右的含水量位于 $23-2\mu\text{m}$ 之间。

9. 用K-M谱拟合的滴谱得出的N值相当好, LWC值偏小, VMD值不能反映实测值。

10. 实测的冰密度为 $0.8\text{g}/\text{m}^3$, Y-12

(II)型飞机撑杆捕获效率为 0.66 , 机翼捕获效率在这个值上下。

参考文献

- (1) James C. McLean, Jr., Safety Hazard of Aircraft Icing, Aircraft Icing, NASA CP 2086, 21-27(1978).
- (2) 白秋华, 飞行与结冰, 北京气象, (4) 78-80 (1987).
- (3) D.T. Bowden, A.E. Gensemer and C.A. Skeen, Engineering Summary of Airframe Icing, Technical Data, AD608865.
- (4) FAR 25. Airworthiness Standards Transport Category Airplanes, Federal Aviation Regulations, Part 25, Appendix C, (1965).
- (5) Aircraft Icing NASA CP 2086 (1978).
- (6) Marcia K. Politovich, Characteristic of Icing Conditions in Wintertime Stratiform Clouds, Preprints to the Conference on Cloud Physics 15-18 Nov., Chicago, IL, Amer. Meteor. Soc. 404-109 (1982).
- (7) M.K. Politovich and W.R. Sanl, Measurement of Natural Aircraft Icing Conditions, AIAA Aircraft Systems and Technology Conference (1981).
- (8) J.C., 物理气象学, 王鹏飞译, 218 (1960).
- (9) Khrgian, A. Kh. and I.P. Mazin, Analysis of Methods for Describing Cloud Droplet Spectra, Trudy TSAO, No. 7, (1-56).
- (10) Norton Glass Droplet Spectra and Liquid Water Content Measurements in Aircraft Icing Environments, 同(6) 400-403

A case study of droplet spectra and liquid water content measurements in aircraft icing environments

Chen Yao Ma Peimin You Laiguang

(Institute of Weather Modification AMS)

Abstract

It is the first time to study the microphysical conditions associated with aircraft icing in PRC. The flights were made in winter stratiform and stratocumulus clouds. Icing data of about 5-6 hours was obtained during 1986-1987 winter season. In this paper horizontal and vertical variations of LWC, VMD and droplet spectra in one flight are discussed. Khrgian-Mazin form does not fit well with the spectra because of their bimodal distributions.