

## 冰碰冻增长的实验研究\*

郑 国 光

(新疆自治区人工影响天气办公室)

### 提 要

冰质粒碰冻过冷却水滴而增长是自然雹块增长的主要机制, 研究碰冻增长的条件与所形成的冰的微物理特征的关系有助于了解自然雹块增长的微物理过程。本文首先介绍了用于研究碰冻冰增长的实验设备设计、实验参数的控制和测量以及实验方法, 然后讨论了碰冻冰微物理参数(诸如, 冰密度、冰生长率、冰中气泡结构和晶体结构, 以及平均捕获效率等)与生长条件之间的关系, 这为利用自然雹块微物理结构研究其生长情况提供了很有用的资料。

### 一、引 言

雹块是雹云中宏观动力过程和微观物理过程综合作用的产物, 但因雹云中对流十分剧烈且云中雹块下降有破坏力, 所以很难利用飞机或探空仪深入云中获取资料。多卜勒雷达虽然能测出雹暴的三维空间流场结构和演变特征, 但其使用尚不普遍, 且也不能测出雹云中温、湿度场, 因此, 迄今还没有能够很好地解决对云中雹块直接探测问题。在这种情况下, 研究雹块微物理结构以推估雹块生长情况的方法受到人们的重视。冰雹本身的微物理特征可以在一定程度上反映出它在雹云中的生长过程和雹云的宏观情况。但是, 要根据冰雹微观结构来说明它的生长条件, 就必须对冰雹微观结构与生长条件之间的关系有所了解。为此, 本文在实验室中通过控制生长环境条件来模拟冰雹的生长, 以分析在不同生长条件下冰雹的微观结构。

早在1800年, Alessandro Volta对雹块内部分层结构曾作过描述。1938年, Schumann首先提出冰雹生长理论, 他假定冰雹在云中下落过程中碰冻它所扫过的体积内所有过冷却水滴增长。1950年, Ludlam根据Schumann提出的冰雹生长理论, 研究结淞圆柱冰碰冻过冷却水滴生长特征, 提出了冰雹“干”、“湿”生长层的概念。五十年代末, List研制了第一台用于模拟雹块生长的气象风洞, 提出了冰雹“海绵状”生长理论。随着冰雹切片技术的广泛应用以及不同类型冰雹研究的实验设备建立和实验, 冰雹微物理研究日趋深入。Macklin, Carras, Rye<sup>[1]</sup>, Knight<sup>[2]</sup>, Levi<sup>[3]</sup>等人都曾做过模拟冰雹生长的实验, 然而, 各自的实验结果均存在明显差异。本文对作者设计的碰冻成冰实验原理、主要实验参数的控制和测量进行讨论, 并分析由此而得的碰冻冰结构特征与生长条件的关系。

\* 本文于1984年9月1日收到, 1985年2月13日收到修改稿。

## 二、实验设备的设计

冰雹的增长主要靠与云中过冷却水滴的碰冻。在不同生长环境条件下生长的雹块有不同的结构特征。碰冻成冰实验抓住冰雹的主要增长过程,研究碰冻过冷却水滴增长的冰结构特征,再由实验得出的碰冻冰结构参数与生长条件的关系,从自然雹块的微结构特征推估它的生长条件。因此,实验设备也就围绕控制和测量碰冻冰生长环境参数来设计的。

1. 环境温度场 碰冻成冰的低温环境是一个容积为  $55 \times 53 \times 52 \text{ cm}^3$  的低温箱冷室(如图 1),冷室四壁和底壁五面同时制冷,冷室温度在  $0 \sim -60^\circ\text{C}$  之间可以自动或手动任意调节。自动调节时,冷室温度可保持在所要求温度的  $\pm 1$  度范围内。手动调节时,冷室温度变化幅度则更小。采用热电偶温度计连续测量冷室环境温度。

2. 环境气流场 在冷室中放置一个小风洞(如图 1),风洞输入截面面积为  $17 \times 14 \text{ cm}^2$ ,经过  $8 \text{ cm}$  长的收缩段后进入横截面积为  $9.3 \times 7.5 \text{ cm}^2$ 、长为  $28 \text{ cm}$  的工作段。通过调节风洞电机电压可得到不同的风洞工作段风速,最大风速为  $20 \text{ m/s}$  左右。采用补偿式微压表来测量风洞工作段的风速。

3. 过冷却水滴 直接产生过冷却水滴还很困难,只能靠水滴在负温环境中逐渐冷却成过冷却水滴。实验中采用抽气吸水高压喷撒的原理,过冷却水滴发生器输入来自冷室中的冷气和放置于冷室中冷却蒸馏水,输出冷却水滴,然后在冷室中冷却而成过冷却水滴。调节水滴发生器输出空气压力和喷头口径可以得到不同的滴谱和喷水率(即单位时间的喷水量)。过冷却水滴平均直径为  $6.0 \sim 13.8 \mu\text{m}$ ,最大直径为  $18 \sim 35 \mu\text{m}$ ,喷水率为  $9.0 \sim 60.0 \text{ ml/min}$ 。

然而,到达碰冻冰表面处的水滴是否是过冷却的液态滴?从过冷却角度来看,水滴滞留在低温环境中时间长些,水滴温度才接近于环境温度;但从冻结角度来看,水滴在低温环境中滞留的时间最好短些,否则水滴在碰撞到基底冰表面前已发生冻结。在实验设计中,综合考虑了这个问题。根据 Macklin (1963)<sup>[4]</sup>对小水滴与环境空气之间热量不平衡程度所做的数值计算以及 Pruppacher (1978)<sup>[5]</sup>对小水滴悬浮冻结时间的理论和实验研究结果,在本文实验中,碰撞到基底冰表面的水滴基本上是不发生冻结的液态滴。

4. 环境含水量场 这里所指的环境含水量是单位时间内流过基底冰所在迎气流单位截面的水滴总质量。显然,环境含水量可以通过调节水滴发生器的喷水率来改变。由于水滴发生器喷出的水滴部分地将碰冻到风洞内壁上,所以,实验中对风洞壁上结冰量做了测量。但是实验表明,控制碰冻冰环境含水量的主要是水滴发生器的喷水率。实验所用的环境含水量为  $0.37 \sim 3.12 \text{ g/m}^3$ 。

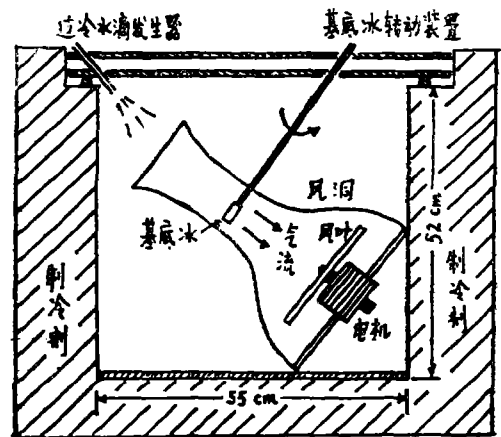


图 1 碰冻成冰实验冷室工作剖面图

实验中还设计了基底冰转动装置(转速在 0.1—1.5 Hz 之间),以模拟自然雹云中雹块翻滚碰冻生长。

### 三、实验程序

#### 1. 制作基底冰并将其安装在风洞工作段

在圆柱形铅模中装满蒸馏水,让其在低温环境中冻结,制得柱高为 2.4 cm、底圆直径为 1.8 cm、重为 2.3 g 的圆柱形基底冰,同时沿基底冰中心轴冻结上一绝热胶管,套在基底冰转动装置的传动杆上。然后,把基底冰放于风洞工作段中部,使其侧面迎气流。采用热电偶温度计测量基底冰表面温度。

#### 2. 进行碰冻成冰实验

调节冷室温度、风洞风速和基底冰转速,使之达到所需要的参数值;选择过冷却水滴发生器喷撒的滴谱,进行碰冻成冰实验。记录水滴发生器喷撒时间和喷水量;测量已增长的碰冻层厚度、体积及其重量;并测量风洞内壁上的结冰量。然后再重复上述过程。图 2 是实验得到的一碰冻冰照片。

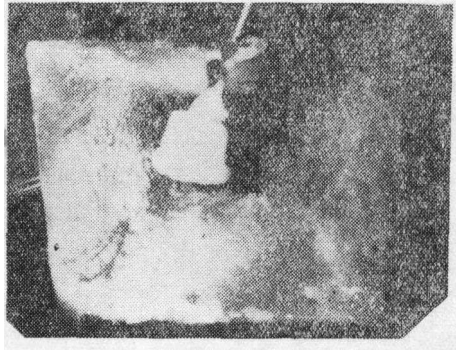


图 2 圆柱形碰冻冰样品照片

#### 3. 切片和照相

整个对碰冻冰进行切片的过程都是在保持一定负温(如 $-5$ — $-10^{\circ}\text{C}$ )的冷冻台上进行的。切片步骤如图 3,切片的厚度为 0.4—0.5 mm。图 4 就是采用图 3 所示切片方法对碰冻冰切片的样品照片。

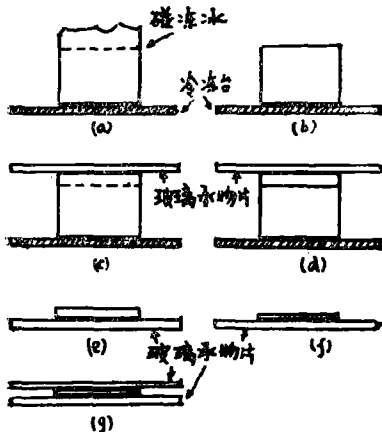


图 3 碰冻冰切片的几个步骤

(a) 选择切片部位;(b) 切片,刮平冰表面;(c) 附一块冷的玻璃承物片于切片表面,再选择切片部位;(d) 切片;(e) 把玻璃承物片和薄切片一起翻转过来;(f) 刮平冰表面,使切片厚度达到要求;(g) 再附一块冷的玻璃承物片于切片表面。

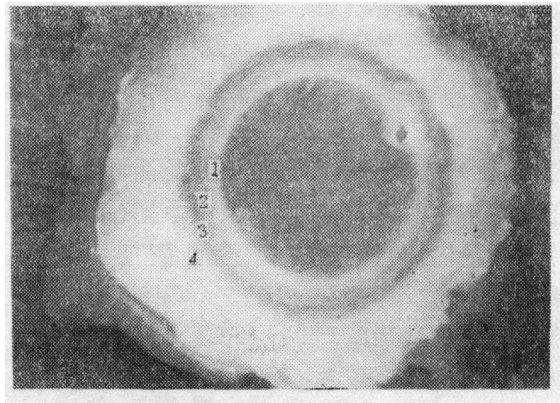


图 4 圆柱形碰冻冰切片照片

将切好的碰冻冰切片放置在温度保持 $-5$ — $-10^{\circ}\text{C}$ 冷室中照相台上,分别在透射光、侧射光和偏振光下对切片进行照相;然后分析其晶体结构和气泡结构。

#### 4. 误差讨论

1) 温度误差 冷室温度和碰冻冰表面温度误差分别为 $1.0^{\circ}\text{C}$ 和 $1.5^{\circ}\text{C}$ ;热电偶温度计测量误差为 $0.1^{\circ}\text{C}$ 。

2) 风速误差 风洞风速误差小于 $1.5\text{ m/s}$ ;微压表测速误差为 $0.2\text{ m/s}$ 。

3) 含水量误差 包括喷水率测量、风洞壁上结冰量测量和风洞风速起伏变化等因素引起的含水量误差,其量值为 $0.1$ — $0.3\text{ g/m}^3$ 。

4) 碰冻冰参量测量误差 厚度、体积和重量测量误差分别为 $0.02\text{ mm}$ , $30$ — $40\text{mm}^3$ 和 $0.05\text{ g}$ 。

5) 晶体和气泡参量测量误差 晶体尺度和气泡尺度测量误差分别为 $10\text{ }\mu\text{m}$ 和 $3\text{ }\mu\text{m}$ 。

产生以上误差的主要原因是设备精度和测量精度不够。与设备和测量误差相比,计算误差可以不予考虑。

## 四、结果与讨论

### 1. 碰冻冰捕获过冷却水滴的平均效率

碰冻冰捕获过冷却水滴的平均效率是根据碰冻冰环境含水量和由碰冻层体积、重量推出的平均有效含水量计算得到的。图5和图6分别给出平均捕获效率与圆柱冰直径和风洞风速的关系。可以看出,平均捕获效率随圆柱碰冻冰平均直径增加而明显减小,随风洞气流速度增加而增大。前者可认为是由于碰冻冰迎气流截面积增加而导致气流场绕流作用增强的结果,后者则是由于气流速度增加,使得气流携带的水滴相对于碰冻冰的速度增加,从而导致气流中有更多的水滴碰冻到圆柱冰上。

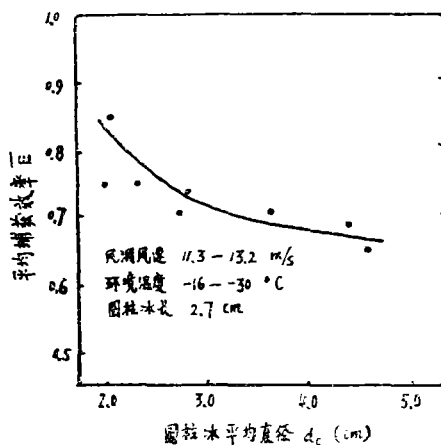


图5 圆柱冰平均捕获效率 $\bar{E}$ 与其平均直径 $d_c$ 的关系

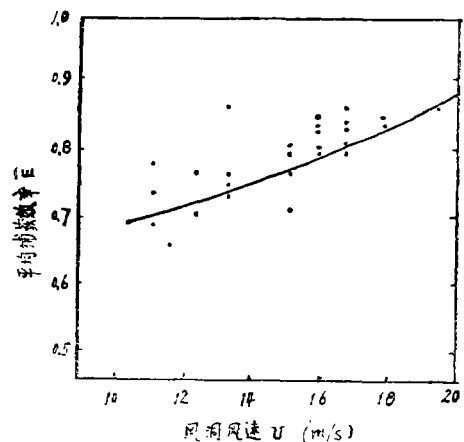


图6 碰冻冰平均捕获效率 $\bar{E}$ 与风洞风速 $v$ 的关系(碰冻冰迎气流截面积为 $2.5 \times 3.0\text{ cm}^2$ )

## 2. 碰冻冰密度

碰冻冰密度是研究碰冻冰生长特征的主要参量之一。图7是由30组实验的碰冻层体积和重量测量得到的碰冻冰密度与环境温度和碰冻冰表面温度的关系。在一定的环境温度下，碰冻冰表面温度也能反映出碰冻冰生长的环境含水量。由图7可见，碰冻冰密度在0.51—0.90 g/cm<sup>3</sup>之间，随着环境温度降低，碰冻冰密度逐渐减小；碰冻冰表面温度愈低，碰冻冰密度愈小。这是因为在较低环境温度下，碰撞到冰表面的过冷却水滴冻结较迅速，使得生长的冰结构松散，而其密度就小。同样，碰冻冰表面温度愈低，也表明冰表面上水滴冻结过程进行愈快，容易使得冰结构松散。

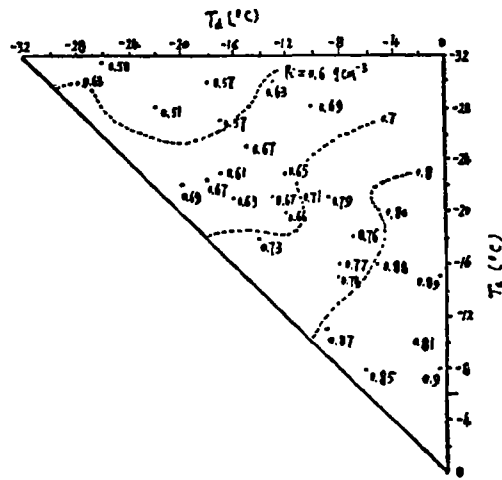


图7 不同环境温度和碰冻冰表面温度下的碰冻冰密度值  $\rho_i$

## 3. 碰冻冰生长率

碰冻冰生长率是指单位时间内碰冻冰层增长厚度，反映了碰冻冰生长特征。图8给出了不同环境温度和冰表面温度下碰冻冰生长率。由图可见，碰冻冰生长率并不明显地依赖于环境温度，而依赖于碰冻冰表面温度，即随冰表面温度降低而减小。从碰冻冰生长的角度，其生长率主要取决于它单位时间单位面积所捕获的过冷却水滴质量，即取决于环境含水量。因此，环境含水量一定时，环境温度对碰冻冰生长率不会产生明显的影响。在一定环境温度下，碰冻冰表面温度反映了环境含水量。如果碰冻冰表面温度接近于环境温度，则表明碰冻过冷却水滴释放的冻结潜热很少不足以使得冰温度升高，可以说碰冻的过冷却水滴不多，因而冰生长率不大。

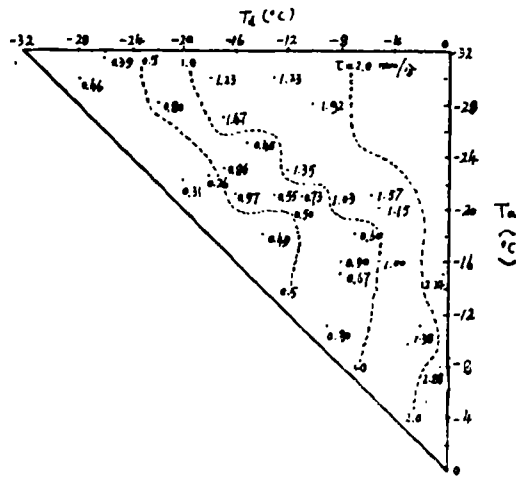


图8 不同环境温度和冰表面温度下的碰冻冰生长率  $\tau$

## 4. 碰冻冰晶体尺度参数

定义：

$$\text{平均晶体长度} \quad \bar{l} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N l_i \quad (1)$$

$$\text{平均最大晶体宽度} \quad \bar{\omega} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \omega_i \quad (2)$$

$$\text{平均晶体形状比 } \bar{\epsilon} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (l_i/\omega_i) \quad (3)$$

$$\text{平均晶体面积 } \bar{\sigma} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N l_i \omega_i \quad (4)$$

式中  $l_i$  和  $\omega_i$  分别为冰切片的晶体长度和最大宽度、 $N$  为切片的晶体数。根据 30 组碰冻成冰实验, 图 9, 10 和 11 分别给出不同环境温度和冰表面温度下碰冻冰的  $\bar{l}$ ,  $\bar{\omega}$  和  $\bar{\sigma}$ 。由这三张图可以发现以下几点:

- (1) 一定的碰冻冰表面温度下, 环境温度愈低, 则碰冻冰的  $\bar{l}$ ,  $\bar{\omega}$  和  $\bar{\sigma}$  愈小;
- (2) 一定的环境温度条件下, 较低的冰表面温度反映出  $\bar{l}$ ,  $\bar{\omega}$  和  $\bar{\sigma}$  较小;
- (3) 在环境温度较高下, 碰冻冰的  $\bar{l}$ ,  $\bar{\omega}$  和  $\bar{\sigma}$  随冰表面温度变化较明显;
- (4) 当冰表面温度较高时, 碰冻冰的  $\bar{l}$ ,  $\bar{\omega}$  和  $\bar{\sigma}$  随环境温度变化较明显;
- (5)  $\bar{l}$ ,  $\bar{\omega}$  和  $\bar{\sigma}$  最大值出现在环境温度和冰表面温度接近  $0^\circ\text{C}$  条件下, 而最小值出现在环境温度和冰表面温度最低的环境中。

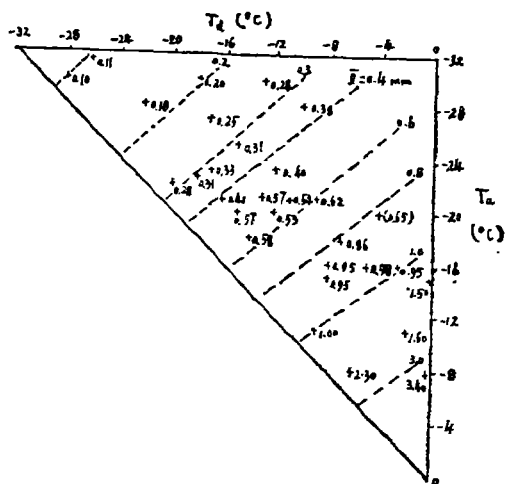


图 9 不同环境温度和冰表面温度下碰冻冰晶体平均长度  $\bar{l}$

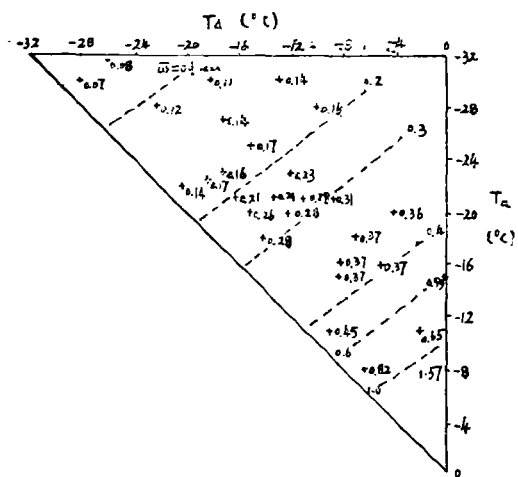


图 10 不同环境温度和冰表面温度下碰冻冰晶体平均最大宽度  $\bar{\omega}$

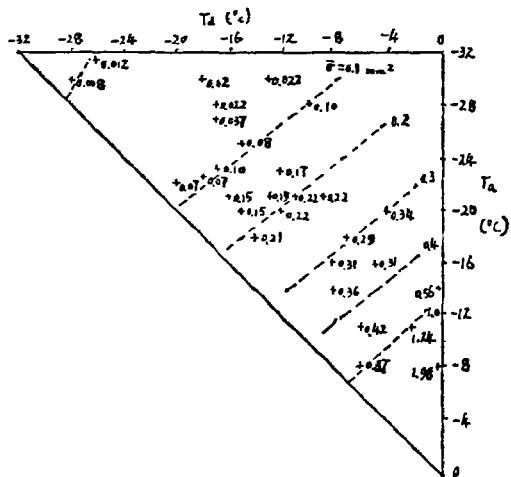


图 11 不同环境温度和冰表面温度下碰冻冰晶体平均面积  $\bar{\sigma}$

以上这些特征可以从碰冻成冰物理过程来解释。碰冻成冰过程是过冷却水滴碰撞到基底冰上再冻结成固态冰, 水滴冻结时要释放潜热, 这些潜热一部分因强迫对流作用而传向环境中去, 另一部分传向下垫冰面。当环境温度很低或者环境含水量很小时, 过冷却水滴碰冻释放的潜热迅速传走, 即碰冻过程进行得很快, 使得冰具有较小的晶格结构。当环境温度较高或环境含水量较大时, 过冷却水滴碰冻释放的潜热较多, 不容易传输, 使得碰冻过程进行很慢, 先后碰撞到冰表面上的水滴有更多的时间组合, 而形成较大的晶格

结构。所以，其晶体的  $\bar{l}$ ,  $\bar{\omega}$  和  $\bar{\sigma}$  也就较大。

为了反映不同生长条件对碰冻增长冰晶体长和宽度的影响，图 12 给出了不同环境温度和冰表面温度下的碰冻冰平均晶体形状比。可以看出，最小晶体形状比出现在环境温度和冰表面温度最低的环境中，但最大晶体形状比出现在  $T_a = -20^\circ\text{C}$ 、 $T_s = -4^\circ\text{C}$  条件下；碰冻冰表面温度愈低，则表明晶体形状比有愈小的趋势；环境温度愈高，则表明晶体形状比有愈小的趋势。

### 5. 碰冻冰气泡结构特征

图 13 和 14 分别给出不同生长条件下碰冻冰气泡尺度和浓度的分布特征。可以看出，随着环境温度或冰表面温度的降低，碰冻冰中气泡的平均直径减小，而气泡面密度增大。这可以这样解释：决定碰冻冰中气泡含量的主要是冰冻结率，冻结愈迅速就愈易在冰中保留高密度的气泡；决定碰冻冰中气泡尺度的是碰冻水滴中未融解的空气量。前者主要受环境含水量和环境温度影响，而后者主要受环境温度影响。

初步测量看出，碰冻冰气泡谱分布与生长环境条件的关系并不明显。

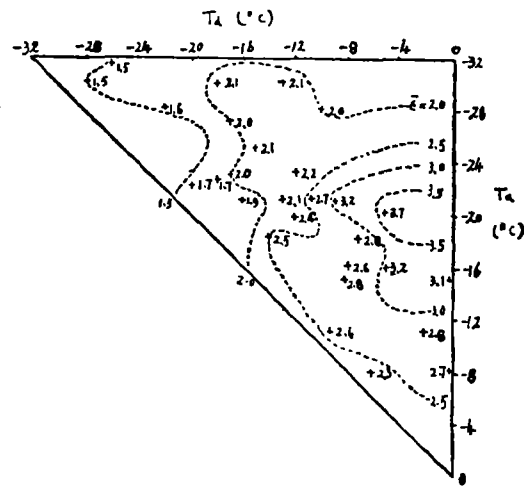


图 12 不同环境温度和冰表面温度下碰冻冰平均晶体形状比  $\bar{\epsilon}$

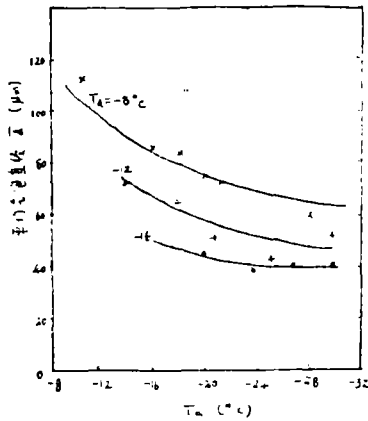


图 13 不同冰表面温度  $T_s$  下的碰冻冰平均气泡直径  $\bar{d}$  与环境温度  $T_a$  的关系

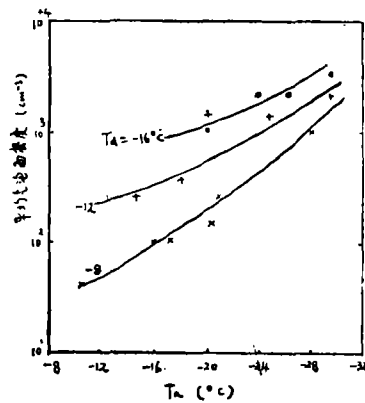


图 14 不同冰表面温度  $T_s$  下的碰冻冰平均气泡面密度与环境温度  $T_a$  的关系

## 五、结果应用

碰冻成冰实验的目的是把实验结果应用于自然雹块生长研究中去。图 15(a) 是实验得到的碰冻冰切片偏振光照片，图 15(b)、(c) 是 1982 年 7 月新疆昭苏降雹中收集的两个雹块切片偏振光照片。可以看出，碰冻冰切片和冰雹切片都具有较明显的晶体结构。表 1

表 1 1982 年 7 月 16 日新疆昭苏降雹中两个雹块晶体参数和生长参数

雹块序号	生长层序号	平均晶体长度 $\bar{l}$ (mm)	平均晶体面积 $\bar{\sigma}$ (mm <sup>2</sup> )	平均晶体形状比 $\bar{\epsilon}$	环境温度 $T_a$ (°C)	冰表面温度 $T_s$ (°C)	雹块锥高 $H$ (mm)	距海平面高度 $Z$ (km)
I	1	1.48	1.85	3.2	-13.5	-2.0	5.2	6.10
	2	0.30	0.06	1.8	-24.5	-18.0	5.7	7.55
	3	0.94	0.24	3.4	-21.0	-8.0	7.2	7.10
II	1	2.04	1.35	3.5	-11.0	-2.0	3.8	5.80
	2	0.14	0.04	1.2	-25.0	-20.0	6.3	7.65
	3	1.15	0.39	2.3	-16.0	-11.0	7.2	6.40
	4	0.33	0.05	1.9	-22.5	-17.0	7.5	7.30

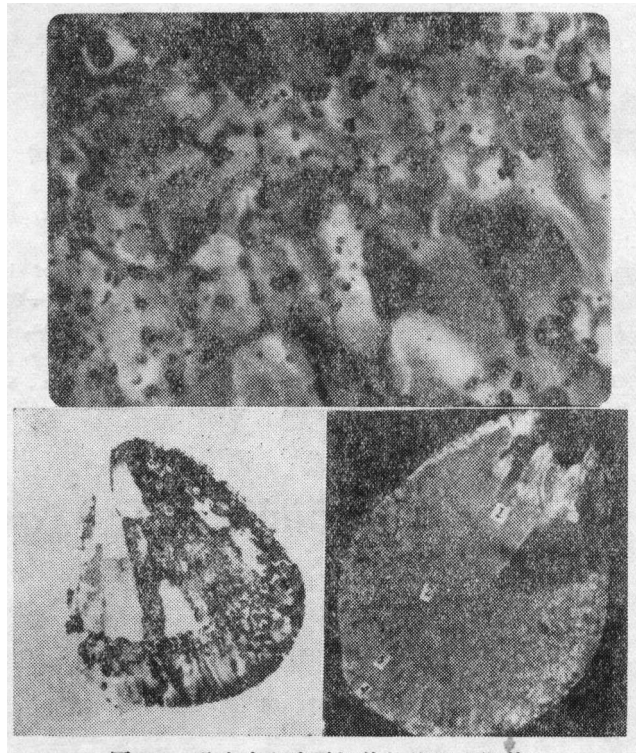


图 15 碰冻冰和冰雹切片的偏振光照片  
(上:碰冻冰切片;下左:冰雹 I 切片,下右:冰雹 II 切片)

给出雹块 I 和雹块 II 各生长层晶体尺度参数和生长参数,图 16 是根据探空资料推出的雹块随高度生长情况。可以看出,雹块 I 经历了一次上升增长过程,雹块 II 经历了二次上升增长过程;两个雹块的雹胚都产生于低层;雹块生长的高度范围为 2 km,这与当时观测的雷达强回波核心正好对应;两个雹块生长时的表面温度都低于  $-2^{\circ}\text{C}$ ,说明它们一直处于干生长状态,这与降雹实测的雹块低密度结构是一致的。

以上利用本文碰冻成冰实验资料分析雹块生长还是较粗糙的,如何合理地把实验资料用于研究自然雹块生长还需今后进一步探索。

此外,本文实验中也存在一些问题,例如,没有估计气流中冰晶存在可能对碰冻冰结构的影响;用于产生过冷却水滴的液水不是实际云水;过冷却水滴滴谱并不能代表实际雹



云中云滴谱,等等。这些尚待今后进一步研究。

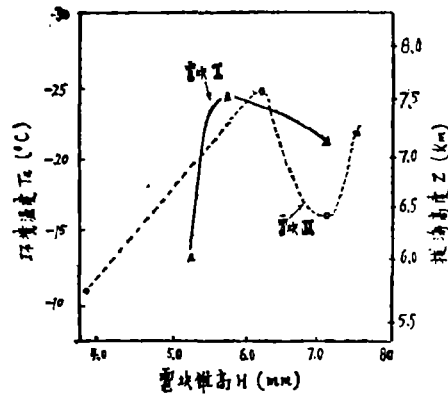


图 16 新疆昭苏两个雹块随高度生长情况

### 参 考 文 献

- [1] Macklin, W. C., J. N. Carras and P. J. Rye, The interpretation of the crystalline and air bulbbble structure of hailstones, *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, **102**, 25—44, 1976.
- [2] Knight, C. A., and A. Shworth, Cylindrical ice accreted as simulations of hail growth. Part II: The structure of fresh and annealed accretions, *J. Atmos. Sci.*, **35**, 1997—2009, 1978.
- [3] Levi, L., and Prodi, Crystal size in ice grown by droplet accretion, *J. Atmos. Sci.*, **39**, 2181—2188, 1978.
- [4] Macklin, W. C., Heat transfer from hailstones, *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, **89**, 360—369, 1962.
- [5] Pruppacher, H. R., and J. D. Klett, *Microphysics of cloud and precipitation*, D. Raidal Publishing Company, Dordrecht Hollaud, 1978.

## EXPERIMENTS IN ICE GROWTH BY ACCRETION

Zheng Guoguang

(Weather Modification Office, Xinjiang)

### Abstract

The growth of ice particles by accretion of supercooled water droplets is the fundamental growth mechanism of natural hailstones. The relation between the growth conditions of accreted ice and its microphysical characteristics is studied to understand the microphysical processes of natural hailstone growth. Here, the design of equipment for experiments in accreted ice growth, the control and the measurement of the growth environmental parameters, and the results of these experiments are presented. Also, the relation between the microstructural parameters of accreted ice and their growth conditions is analyzed. Thus, the growth conditions of two natural hailstones from a hailstorm in Zhaosu, Xinjiang, in July, 1982, are analyzed by using the results presented in this paper.