

用于研究冰雪晶生长的小型垂直过冷云风洞系统*

龚乃虎 陶树旺 牛玉清

(中国科学院兰州高原大气物理研究所, 兰州 730001)

提 要

研制了一个新的小型垂直过冷云风洞及其测试系统, 实现了风、温数据自动采集, 风洞内含水量测量方便易行, 实验测量了温度 $-5 \sim -18^\circ\text{C}$ 、含水量 $0.5 \sim 3.0 \text{ g/m}^3$ 范围内冰雪晶生长的习性、下落速度、线性尺度增长率等诸参数。

关键词: 冰雪晶; 过冷云风洞; 数据测量; 记录系统。

一、引 言

要搞清楚自然降雪机制, 雹胚的起源以及人工影响天气中过冷云的催化效果, 了解冰雪晶的生长过程是必要的先决条件。为了获得有关的知识, 进行冰雪晶生长的实验室研究, 在确实可控条件下, 重复此过程是个重要的方面。

早在 50 年代科学家们已经开始了冰雪晶的室内实验研究。Nakaya^[1] 在对流云室的可控环境下第一次在兔毛上成功地生长出了一些雪晶。Hallet 和 Mason^[2] 在扩散云室中用细的纤维作冰晶生长研究。王昂生、Fukuta^[3] 用楔形冰面热力扩散云室研究不同温度和过饱和度条件下冰晶 2a 和 c 值的生长性能, 冰晶在尼龙丝上生长获取广泛范围的三维信息。这些研究者的实验生长出的雪晶大小及形状均类似于自然界的雪晶, 但冰(雪)晶在其他物体的表面(如纤维丝或金属平面)上生长, 这就使冰晶生长受到一定的限制, 跟自由大气的情况不完全一样。Fukuta^[4] 第一次企图在自由降落条件下, 定量地同时测定冰晶增长与下落的参数, 尽管生长期仅约 1 分钟左右。Ryan 等^[5,6] 将生长期扩展到 3 分钟, 但没有测量下落速度。Fukuta、龚乃虎等^[7,8] 用一个 1.6 m 的过冷云风洞, 采用空气动力学的技巧, 使冰雪晶能自由悬浮生长, 大大延长了生长期, 成功地长出大到 3.4 mm 的雪花, 但同一时间只允许生长一个冰晶。Takahashi^[9] 建造了高 18m 直径 1m 的风洞, 同时能让很多冰晶生长, 然而生长出的冰雪晶较前者小。

以往的工作人们关心的是冰相质点生长与温度、环境过饱和度的关系, 缺少对液态含水量与冰晶生长关系的研究。另外大气中冰晶生长及其动力学问题的复杂性,

本文于 1990 年 10 月 31 日收到, 1991 年 1 月 17 日收到修改稿。

* 国家自然科学基金资助项目。

冰晶生长和下落问题由于其形状的复杂多变显得更加复杂, 使得冰晶生长的理论研究遇到一些无法回避的困难, 更显示实验研究的意义和价值. 为了开展我国的冰雪晶实验研究, 根据现有的条件与设备, 我们研制了小型垂直过冷云风洞及其测试系统. 它虽与美国犹他大学的小风洞十分相似, 但有我们的特色, 我们自行研制了测温度、风的装备(风温数据采集控制仪), 实现了风、温数据自动采集, 风洞内含水量测量方便易行, 为进行含水量对冰雪晶生长影响的风洞实验工作提供了条件.

二、垂直过冷云风洞

1. 冷冻设备

冷冻实验室由大楼底层朝北的一间办公室按照保温、隔热、防潮条件改装, 实验室一隔为二, 内间为冷冻室, 空间 $2.8 \times 2.3 \times 3.1 \text{ m}^3$, 云雾生成室、风洞放在其内; 外间为观测操纵室, 大小为 $2.8 \times 2.6 \times 3.1 \text{ m}^3$, 风、温数据采集系统等设在这间. 制冷设备为上海冷气机厂以 JZS-2F10 活塞式压缩机组为主机的水冷式制冷系统, 从室温降到 -18°C 约需 2 小时, 冷冻室最低降温可达 -30°C , 加接温控仪, 可自动开、关冷冻机, 控制冷冻室温度精度为 $\pm 1^\circ\text{C}$ 左右.

2. 小型垂直辐合过冷云风洞

参考 Fukuta 等人的工作, 结合我们具体的条件, 设计制作了简易云雾生成室和

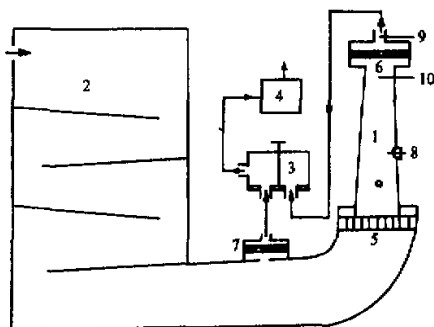


图1 过冷云风洞示意图

- (1) 冰雪晶生长实验区 (2) 云雾生成室
- (3) 气流控制阀 (4) 干湿真空吸气机
- (5) 蜂窝器 (6、7) 吸气室
- (8) 取样装置 (9) 风速测量探头
- (10) 温度测量探头

垂直风洞. 材料采用有机玻璃板, 耐水、耐腐蚀、轻便透明便于观测, 结构组装上注意了密封. 主体由云雾生成室、四棱台形辐合风洞、弯道、蜂窝器和吸气室等组成(见图1). 云雾生成室为 $0.7 \times 0.9 \times 1.55 \text{ m}^3$ 的立方体, 中间有对插的三层隔板, 过冷雾从上向下移动, 扰动减弱, 最后浓度、温度变得相对均匀. 出口与风洞弯道相连. 风洞包括弯道、蜂窝器、冰雪晶生长实验区、二个吸气室, 外用中空角铁搭架固定. 设弯道目的是使气流由水平转为垂直. 风洞工作段下底为 $20 \times 20 \text{ cm}^2$ 、上底为 $11 \times 11 \text{ cm}^2$ 、高 89 cm 、壁厚 3 mm . 这种辐合结构为风洞提供了鞍形风速度廓线. 风洞右墙中下部有一直径为 3.5 cm 小圆孔, 为冰

晶取样、测风洞内含水量用. 前墙下部直径 8 mm 小圆孔供产生初始晶胚用. 左墙上部直径 3 mm 小圆孔安装风洞测温元件—— 100 W_3 型薄膜铂电阻. 蜂窝器为排满直径 6 mm 、长 10 cm 塑料吸管的抽斗, 在弯道与工作段之间, 使气流进入工作段时尽可能减少扰动. 吸气室(1)在风洞顶部, 通过吸气室中泡沫塑料过滤使气流均匀. 此

室顶部装有电子微风仪探头，感应风洞内气流。吸气室(2)在弯道直段上方。

3. 吸气系统

由一个干湿真空吸气机、气流控制阀、柔韧软管与风洞连接组成。干湿吸气机(CV-980W)吸取经过风洞的过冷雾，它既可提供较合适的风洞气流率，又能长时间耐低温、耐潮湿。气流控制阀设计成转动其手柄内板相应转动，恰巧使内板上的一个圆洞与外板上的一个管洞正对接(全开)；另一个管洞则全闭。而当转动到与另一个管道全开时，原先全开的管道却全闭。即吸气线路上，一条线路开，则另一条线路关。调节控制阀上盖板缝隙可二次调节风洞内气流的速度。通过这样的控制装置，使冰晶自由悬浮在冰雪晶生长实验区并逐渐生长。当吸气机开动，云雾生成室内的过冷雾在气流控制阀的操纵下，若风洞吸气室(1)管道全开(此时吸气室(2)管道全闭)，过冷雾全部流入风洞；若风洞吸气室(1)管道全闭，过冷雾通过吸气室(2)为吸气机抽走；当控制阀滑动内板转到中间位置时，两条吸气线路各开一半，各走一半气流，而总的流量不变。因此在总的定常吸气条件下，风洞冰雪晶生长实验区截面内的气流率得以调节。这样的设计也可保证吸到过冷雾生成室的空气体积一定，当进到云室的水汽量一定时，雾很均匀，即使通过风洞冰雪晶生长实验区的雾流率在变化，过冷雾条件仍保持不变。

4. 蒸汽发生器

云雾生成室中的过冷雾用蒸汽冷凝法生成。蒸汽的供给是由高压气泵将一高压锅中的热汽通过紫铜管送入云室。高压锅中的水用一个1200W的电热器加热。压缩空气的流量用一流量计调节，当压缩空气的流量调到一定值时，云雾生成室中过冷雾的含水量可以通过控制高压锅内水的温度来控制。水温则用数字温度显示控制仪自动控制。这部分装置如图2所示。

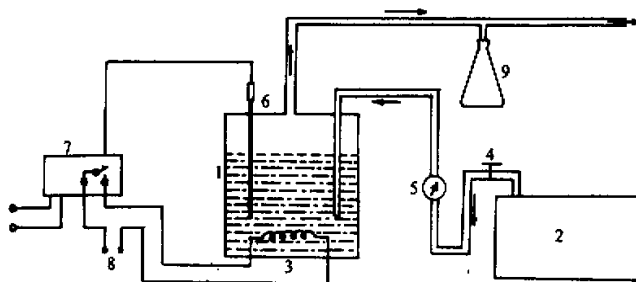


图2 蒸汽发生器示意图

- (1) 高压锅 (2) 空气压缩机 (3) 电热器 (4) 气流控制开关 (5) 流量计
(6) 温度控制探头 (7) 数字温控仪 (8) 电源 (9) 存水瓶

5. 照明及除霜

风洞右侧支架上放有ZZHD-2型幻灯机，具有24V、150W卤钨灯泡，调节镜头至光照合适供风洞中过冷雾里的小冰晶(雪花)悬浮生长观测照明用。风洞工作段有机玻璃前窗及蜂窝器内结霜，影响观测及过冷雾的供给，采用感应电吹风(550W)吹热风使墙上或塑料吸管内结霜融化掉，恢复透明或通畅。

6. 提高悬浮稳定性能

风洞系统加工安装完毕进行模拟冰晶悬浮试验时,模拟物悬浮得相当稳,说明已具有鞍形的风速度廓线。但进行冰晶悬浮试验时,冰晶常常在风洞中无规则运动,使实验难于进行。模拟悬浮试验在不降温不供雾的情况下进行,而实际冰晶生长实验在降温供雾下进行。云室中的雾是用蒸汽冷凝法生成,尽管是过冷雾,由于没有足够冷却,通过风洞时温度仍高于风洞四壁的温度,有一个温差。从传热学的角度讲,温度场和速度场是相互联系的,当温度不均匀的时候,存在促使流体产生附加流动的力,即自由对流,使风洞中的鞍形速度廓线复杂化。为了消除由温度差引起的不利影响,在风洞工作段缠绕 30W 的电热线,并用泡沫塑料包起来,以提高风洞壁的温度,这样处理后,冰晶水平悬浮稳定性大大提高。

7. 冰晶发生及取样

先使云雾生成室、风洞所处的房间降温到实验所需的温度,并将高压锅中的水加到预定的温度,然后打开气泵供给云室水蒸汽,过不久云室中便有雾产生,打开干湿吸气机使过冷雾从风洞中流过,然后转动气流控制阀使风洞中气流速度近于零。冰晶发生是采用爆泡催化技术,通过风洞前壁下部小孔造成过冷雾中产生大量晶胚。调节风洞气流,跟踪一个晶胚,观测其生长。当冰晶生长到预定时间时,将涂机油的载玻片由工作段取样口伸进风洞,使冰晶轻轻降落其上,最后将取样到的冰雪晶显微照相。

三、数据测量系统

1. 风洞中气流和温度的测量与记录

用一风,温数据采集控制仪对风洞中气流的速度与温度进行连续自动地测量与记录。此仪器由 EY3-2A 型电子微风仪、测温电桥、A/D 转换面板、风、温测量控制功能板及 TP801B 单板机组成。风速和温度值分别经各自的测量探头转换成相应的电压值,再经 A/D 转换及软件处理后即得实际的气流、温度值。需要指出的是 EY3-2A 电子微风仪的风速测量范围分为两档: 0.05—1 m/s 及 1—30 m/s。用相应的软件控制继电器即可实现自动换档。测流速和温度的换档由软件控制另一继电器来完成。风、温测量控制功能板原理图略。

气流、温度的数据采集以 1 分钟为一个测量周期。每次采集取三个流速值的平均值,取一个温度值作为此次测量值。每次实验的采集次数 n 可预先设置,程序启动后便自动按设置的次数进行数据采集,最后打印出 n 组气流、温度值。

2. 含水量测量

风洞中过冷雾的含水量是重要的云物理参量。已有的测含水量方法都不是令人满意的。中国科学院北京大气物理研究所研制的三用滴谱仪使用起来比较方便,但由于尺寸的限制无法将其伸进风洞的工作段去进行测量。利用三用滴谱仪含水量测量取样头,把取样头套上橡皮塞安装在风洞工作段冰晶取样孔的地方,用一根橡皮管再把取样头和吸尘器连起来,开动吸尘器便可抽取风洞中的云雾样品,然后根据吸水纸上斑痕

的大小算出含水量。由于吸尘器的吸气能力大大超过了取样头所允许的量，需在橡皮管上旁侧开口分流，使进入取样头的气流速度符合要求。据三用滴谱仪的说明要求和换算曲线，取样头的进气速度调整在30—35 m/s 范围内，在这种工作条件下，捕获系数取1。

经过测试，垂直风洞内过冷雾含水量通常在0.4—2.2 g/m³，大时可达4.2 g/m³。当给定空气流量，压力锅水温与含水量关系见表1。

表1 压力锅水温与含水量对应关系

T (°C)	62	72	80	85
LWC (g/m ³)	0.5	1.0	1.5	2.0

由于云雾生成室中气流路径上结霜等原因，在给定的气流量和水温时，要获较精确的含水量值，仍需用上述提到的方法进行具体测量。

3. 冰雪晶微物理结构观测

一台 XSS-2 型摄影生物显微镜安置在冷冻室内风洞旁边，供冰雪晶微物理结构观测。从风洞中取出的自由悬浮生长冰雪晶样本及融化后相应水滴收集在一块盛有硅油的凹痕载玻片上，在显微镜下观测并照相。

四、风洞工作实例

风洞工作实例的工作范围在-5—-18 °C，含水量变化在0.5—3.0 g/m³。下种冰晶引入后，冰晶保持在一定温度范围内(±1.5 °C)的过冷云上升气流中增长5—20分钟。在这段时间里，相当于冰雪晶在过冷云中自由下落生长，下落生长的距离可达数百米之巨，对研究其生长特性极为有利。

1. 风洞实验模拟出的部分冰雪晶照片

各种温度、不同含水量、不同生长时间获取的部分典型冰雪晶照片(见图版1图3)。它是让晶胚按预定时间在风洞中生长取样后再在显微镜下拍照获得的，从而可对冰雪晶进行相当仔细的研究。图中冰雪晶与自然冰雪晶在形状、大小上相当接近。照片下的八位数字，头两位表示负温度，三、四两位表示含水量(10⁻¹ g/m³)，五、六两位表示冰晶生长时间(分钟)，最后两位表示尺寸(10⁻² mm)。由图可见，在不同的温度下，冰晶形状不同，类似于美国^[7,8]工作的结果。同一温度，含水量大，雪晶表面捕获的过冷水滴明显增加。试比较照片d和e及g和h。

关于冰晶尺寸，我们控制云室风洞温度，让冰晶在间隔1 °C的各种温度下生长，生长时间都取13分钟，发现冰晶2a轴尺寸最大在-15 °C(相当于分枝状冰晶)，最小在-9—-10 °C(相当等距状冰晶)，c轴尺寸最大在-5.5 °C(相当于鞘状冰晶)，最小在-15 °C(分枝状冰晶)，结果与过去的工作相似。

2. 冰雪晶下落速度和含水量、生长时间的关系

图4显示了-10 °C，-15 °C二种温度下，冰晶下落速度，生长时间和含水量的关系。可见，温度相同，含水量高，冰晶下落速度增长快。所以，含水量大，有利

冰晶生长.

图 5 表示的是相同生长时间(都是 13 分钟),下落速度随温度的变化. 图中明显可见, 在 -10°C 附近有一速度增长峰值区, -14.5°C 、 -5°C 附近是二个速度增长低谷区. 这种现象与这些温度对应的冰雪晶形状有关. -10°C 时, 生长的冰晶是等距冰晶, 它更接近球形, 体积小, 密度高, 经受空气动力学阻力小, 下降速度就快. -15°C 、 -5°C 分别对应分枝状和鞘(针)状, 由于它们的形状、受到空气动力学阻力大, 所以下落速度低.

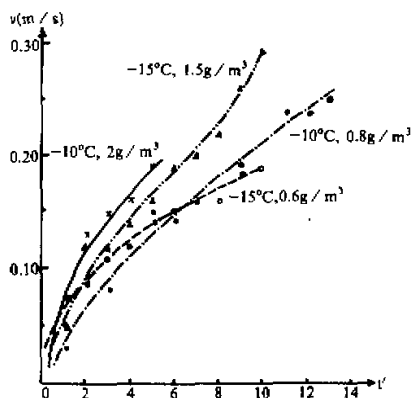


图4 冰晶下落速度和含水量、生长时间的关系

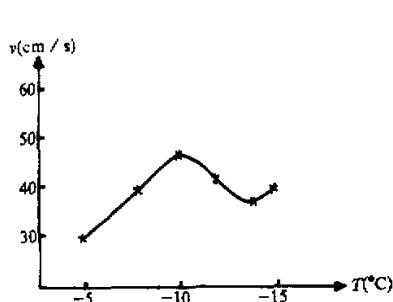


图 5 冰晶下落速度随温度的变化

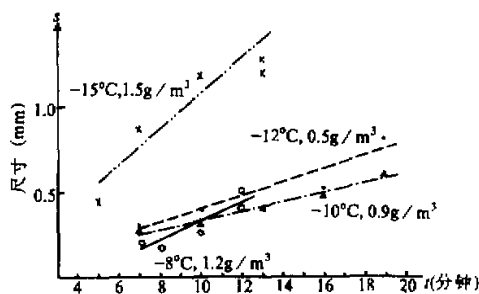


图6 一定温度、含水量条件下,冰晶尺度随生长时间的变化

3. 冰雪晶尺度的增长率

在每次实验中,以规定的时间间隔对冰晶取样并照相,根据这些序列照片,每次都测量平面晶沿 2a 轴的最大直径及柱状晶沿 c 轴的最大长度,然后从这些结果计算每次实验条件下沿 2a 轴或 c 轴方向的增长率. 分析发现,在定温下,冰雪晶尺度随时间线性增加(见图 6).

4. 淞附雪晶实例

当送入风洞的过冷雾含水量较高,冰雪晶生长时间较长,观测到淞附雪晶. 它的二个例子见图 3d、e 和 g, h. d、e 温度都是 -11°C , d 含水量为 $0.5\text{g}/\text{m}^3$, 生长

时间13分钟，六角双板状雪晶表面附有淞附的过冷水滴。照片e含水量为 $1.0\text{g}/\text{m}^3$ ，生长时间仅10分钟，淞附现象相当明显（注意中心偏上部分也是个六角双板冰晶），特别在迎风面的方向，可见含水量起的作用。同样，g，h两张照片，温度都是 -15°C ，生长时间也都是13分钟，都能看到雪晶上附着的过冷水滴，但由于含水量不同，h上淞附现象更明显。再拿e和h二张照片比较，e淞附更强，与其形状较接近球形、下落速度快，过冷水滴更易淞附（碰冻）其上有关。

表2 几种温度下冰雪晶沿2a轴及c轴的增长率

温 度 ($^\circ\text{C}$)	-8	-10	-12	-14.5
2a 轴增长率 ($\mu\text{m}/\text{s}$)		0.5	0.7	1.7
c 轴增长率 ($\mu\text{m}/\text{s}$)	1.0			
含 水 量 (g/m^3)	1.2	0.9	0.5	1.5

五、结 论

研制了一个小型垂直过冷云风洞系统，成功地演示了冰晶增长到接近自然雪晶的大小及雪花形成。这个风洞系统对在可控条件下（包括温度、含水量、生长时间等）进行降雪机制的基础研究，包括研究冰晶、雪花、淞附雪晶的形成过程将被证明是有用的。

实验分析中涉及到含水量变化对冰晶增长的影响，这方面的工作将深入进行下去并另文讨论。

致谢：本文曾得到杨颂禧、王万钟等同志的帮助，在此深表谢意。

参 考 文 献

- [1] Nakaya, U., 1954, *Snow Crystals: Natural and Artificial*, Harvard University Press, Cambridge, 151—176.
- [2] Hallet, J., B. J. Mason, 1958, The influence of temperature and supersaturation on the habit of ice crystals grown from the vapour, *Proc. Roy. Soc. London*, A247, 440—453.
- [3] 王昂生、N. Fukuta, 1984, 冰晶增长规律的定量研究, 大气科学, 8(3), 242—251.
- [4] Fukuta, N., 1969, Experimental studies on the growth of small ice crystals, *J. Atmos. Sci.*, 26, 522—531.
- [5] Ryan, B. F., E. R. Wishart and E. W. Holroyd, 1974, The densities and growth rates of ice crystal between -5°C and -9°C , *J. Atmos. Sci.*, 31, 2136—2141.
- [6] Ryan, B. F. and D. E. Shaw, 1976, The growth rates and densities of the crystals between -3°C and -21°C , *J. Atmos. Sci.*, 33, 842—850.
- [7] Fukuta, N., M. W. Kowa and N. H. Gong (龚乃虎), 1982, Determination of ice crystal growth parameters in a new supercooled cloud tunnel. *Preprint, Conf. on Cloud Physics*, Chicago, AMS, 329—332.

- [8] 龚乃虎, Fukuta, N.. 1985, 为延长冰晶生长期的过冷云风洞研究, 高原气象, 4(4), 293 — 302.
- [9] Takahashi, T., Chikara Inoue, Yoshinori Furukawa, Tatsuo Endoh, Renji Naruse., 1986, *Jour. of Atmos. and Ocean. Techn.* 3, 182 — 185.

A Small Vertical Supercooled Cloud Tunnel System for Studying Ice (Snow) Crystal Growth

Gong Naihu Tao Shuwang Niu Yuqing

(Lanzhou Institute of Plateau Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730001)

Abstract

A new vertical supercooled cloud tunnel and the measuring system had been developed. Air stream speed and temperature are sampled automatically. Liquid water content of supercooled fog in the cloud tunnel can be measured easily. The experimental results show ice (snow) crystal growth behaviour, falling velocity and dimension growth rate with different ambient parameters of LWC and temperature.

Key words: Ice (snow) crystal; Supercooled cloud tunnel; Data measuring and recording system.



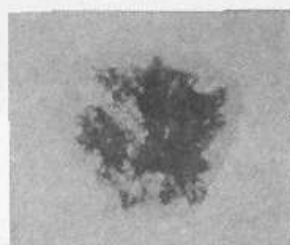
a. 07201340



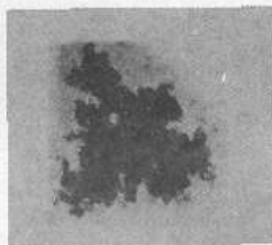
b. 08051332



c. 09151324



d. 11051332



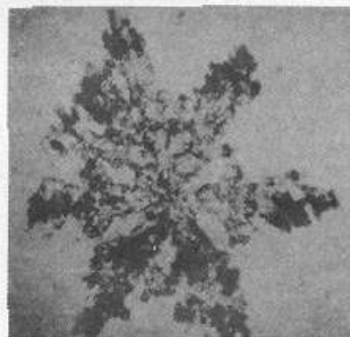
e. 11101036



f. 12051040



g. 15101396



h. 15201398

图3 各种生长条件下，过冷云风洞模拟出的冰雪晶照片