

改进的人工增雨水滴冻结实验装置

杨绍忠 豐大雄

(中国气象科学研究院, 北京 100081)

摘要 介绍一个改进的水滴冻结实验装置, 它由冷腔、冷腔温度控制、水滴冻结信号检测及记录、循环散热和冷环境箱等几部分构成。实验时, 将被测水样分散为数十个均匀水滴, 分布在涂有硅油的冷板上, 温度控制系统使水滴温度线性降低。由于每个水滴中所含冰核引发水滴冻结的温度不同, 群滴将会陆续发生冻结。利用水滴冻结释放的潜热和帕尔帖效应, 在笔式记录仪上自动地连续给出水滴冻结事件的脉冲信号。对某种水样进行多次的冻结实验得到其水滴冻结温度谱, 按 Vali 给出的方法可以推算该水样中冻结核含量。用该装置曾对北京地区各类降水做过冻滴实验, 结果表明不同降水的冻结核浓度的温度谱有明显差异。如能对播云催化作业前后的雨水进行采样并在此装置中进行冻结核浓度的检测, 有望为人工影响天气效果的检验提供一个新的物理判据。

关键词 水滴冻结 实验装置 冻结核含量 人工增雨

引言

自然界中分散的较小水滴(如云雾滴)在负温下并不结冰而维持过冷却状态, 随温度降低它们可通过同质核化或异质核化形成冰相。前人很多实验表明: 对于无杂质的纯净水, 随着温度降低, 水分子随机运动动能减小, 形成临界冰胚的概率(核化成冰的概率)增加, 至 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 所有水都可通过同质核化而结冰。但是在有杂质的水中, 某些杂质粒子可充当形成冰胚的核心, 使冻结温度大大提高, 被称为冻结核(冰核的一种), 它们都有各自的特征温度, 在某个温度下引发冻结——异质核化。无论那种核化, 水冻结的概率都随温度呈指数增加; 水滴越大冻结的概率越高, 因为形成临界冰胚及所含有效冰核的概率越高, 因此在同样的负温下, 大水滴比小水滴更易冻结。在降温过程中, 水滴中只要出现一个冰胚, 就足以促使整个过冷水滴即刻相变成冰^[1]。在自然云的微物理探测中经常发现, 云中的温度在远高于 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时就有冰晶存在了, 在云中适当条件下继续增长成雪花或冰雹, 其原因是云中存在大量的气溶胶粒子, 其中一些可充当冰核, 在较高的负温下即

可通过异质核化而形成冰晶, 为以后的进一步增长奠定了基础。

对冰核化的实验研究也表明: 完成水滴的冰核化过程不但与水的温度、纯度和尺度有密切关系, 而且还与其相互作用的气溶胶粒子本身的化学性质和物理特性相关。无论是人工的还是自然的气溶胶粒子, 它们在不同的核化环境中具有不同的核化机制和相应的核化能力。目前人们认同的有 4 种核化机制: ①水汽在粒子上直接凝华成冰——凝华核化; ②粒子与过冷液滴接触时使水冻结成冰——接触冻结核化; ③水汽先在粒子上吸附凝结出水而后再冻结成冰——凝结冻结核化; ④粒子进入水中随温度降低而冻结成冰——浸入冻结核化。显然, 上述的水滴冻结属于最后一种冰核化机制。

为了模拟浸入冻结机制的冰核化, Vali^[2]在总结前人关于水滴冻结实验研究的基础上, 建立了通过均匀水滴冻结实验检测水中冻结核的方法, 认为水中所含的每一个气溶胶粒子都有一个“特征温度”, 在这个温度下它一定会引起水滴的冻结。由于水滴的冻结与尺度密切相关, 因而在他的实验中特别强调水滴尺度的均匀性, 以保证实验结果有较好

国家自然科学基金项目(49375229)“不同类型气溶胶对冰云形成影响的研究”资助

作者简介: 杨绍忠, 男, 1952 年生, 副研究员, 主要从事云物理室内实验研究及相关仪器设备的研制与开发, Email: yangsz@cams.cma.gov.cn

收稿日期: 2004 年 9 月 1 日; 定稿日期: 2004 年 10 月 29 日

的统计性。Vali 用此方法,曾推算过自然降水中冻结核含量,为模拟浸入冻结机制提供了一种实验模拟技术。鄂大雄等用改进的冻滴实验装置测量过北京地区不同降水物中冻结核浓度的微分谱和积分谱^[3],初步鉴别了不同类型降水中浸入冻结核含量的差别。有人^[4,5]将这一方法与滤膜技术结合起来做冻滴实验,即先用滤膜过滤一定体积空气,其中的气溶胶粒子沉降在滤膜上,将滤膜放在冷台上,而后均匀地滴放一群纯净水滴,随冷台温度的降低,被覆盖于水滴下方面积中的粒子在某一温度下引起水滴冻结。从水滴覆盖滤膜的面积及取样体积,便可换算被测气样中的冻结核浓度。

在人工影响天气中,播撒的冰核气溶胶粒子的成冰阈温和浓度比自然气溶胶粒子要高得多,它们可能以不同核化机制参与了成云致雨的整个过程。因此,不同类型的地面降水中也应包含着反映人工影响的某些信息。如果对播云前的降水和播云后的降水进行采样,分别进行水滴冻结实验,有可能测到这些水样中的冻结核含量的差别,从而有望为人工影响天气效果检验提供一种新的物理方法。

基于上述目的,研制了水滴冻结实验装置,在温度控制、水滴冻结环境、冻结信号的检测和记录等方面作了改进。本文给出了该装置的结构、实验过程和资料整理方法。

1 结构及工作原理

Vali^[2], Murty^[6]等在做水滴冻结实验时,把被测水样均匀滴在以定速降温的冷台上,当水滴陆续发生冻结时,目测或拍照记录水滴冻结事件并记录相应冻结温度。这种操作方法虽然简单,但有以下问题:①冷台上方暴露在不是同步降温的环境中,水滴只有一部分与冷台直接接触,这样水滴本身存在着温度梯度,使测量到的冻结温度存在误差;②由于冷台温度比环境温度低,在其表面会有下沉气流通过,冷台上的过冷水滴有可能与环境空气中的气溶胶粒子通过接触而引起冻结,并不是由水滴内存在的浸入冻结核引起的;③当几个水滴陆续或几乎同时冻结时,目测记录难以应付;④Vali 等所用冷台的温度只能按定速降低,难以实现不同速率的线性降温实验。

基于上述考虑,本装置的冷台是这样设计的,让被测水滴处于一个封闭的冷腔中,全部水滴同步降

温,而水滴本身几乎不存在温度梯度。冷腔由结构完全相同的上下两块冷板扣接形成,与静态扩散云室相似^[7]。上下板各分为4层,最外层为散热槽,槽内充满按一定比例配置的乙二醇和水的混合物,用硅胶软管与热交换箱和高压泵连接,构成一个循环散热系统;第2层为TECF12703型半导体制冷组件(热电偶阵),连接时,上下各4块先串联而后再并联,作为温度控制回路的负载,制冷工作电源为12 V直流,各自的热端分别与散热槽贴接;第3层仍为同样型号的半导体组件,但它不是用来制冷,而是利用帕尔帖效应的逆过程来感应水滴冻结放出来的冻结潜热;其热端用导热硅脂与制冷电偶的冷端紧贴,4块半导体组件串联,上下两组冻滴感应板的正极相接,两个负极接于记录仪的输入端;第4层为1 mm厚镀铬并抛光达镜面的紫铜板粘贴在第3层半导体组件的冷端。上下两块板相对扣接与定位边框一起构成一个面积为64 cm²,高度仅为3 mm的冷腔,将被检测的水滴滴放在下面的紫铜板上,结构见图1。图中所示的冻滴冷台、热交换箱和循环泵都安装在一个经改造的冰柜中,以减少环境温度的影响。

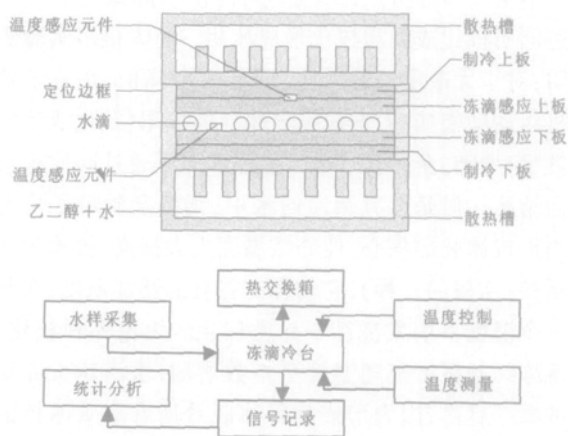


图1 封闭程控式水滴冻结实验冷台和流程示意图

冷台的降温是在欧陆818P4型控温仪的自动控制下实现的。该控温仪是由单片计算机组成的智能仪表,它除了常规仪表所具有的各种控制功能外,还有一些新的功能,如:PID参数自整定、自适应控制、程序给定、数字通讯以及过冲抑制等。另外,它的输入和输出信号的类型及范围都可任意设置。装置的温度测控系统如图2所示。一个微型铂膜温度感应元件(型号:Pt100)被内嵌在制冷上板的冷端作为控温仪的输入,由温度感应元件感应制冷板温

度并据此按预置在控温仪中的运行程序自动加大或减小电源的输出功率,以维持某一线性降温速率的运行。控温仪可以按用户需要输入 4 条执行曲线的自动运行程序,而每条曲线还可以设置 8 个保持段。由于整个装置有一定的热容量加上环境因素的影响,随温度降低需加大制冷功率以保证水滴线性降温,事先通过试验将几段不同降温速率连接起来形成一个降温程序,运行该程序便可保证实验中水滴线性降温率为 $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$,或 $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。

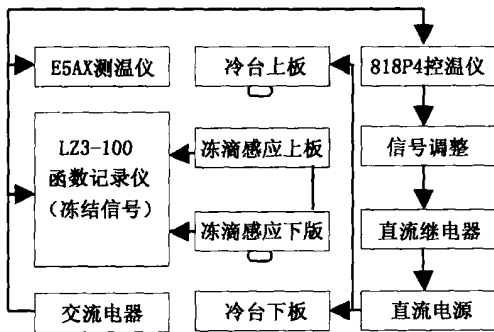


图 2 冻滴实验冷台温度测控示意图

水滴冻结事件的检测与记录过程:当系统制冷时,由于上下两块冻滴感应板的极性是反接的,回路中随温度降低而产生的电动势相互抵消,故在记录仪上应表现为一条不随时间变化的直线。只有当下板上的水滴冻结释放潜热,使上下板出现温差时,记录仪上才产生相应的“脉冲”信号。为了得到每个水滴的冻结温度,用另一个微型铂膜温度感应元件(型号: P₁100)贴接在盛放水滴的下紫铜板上作为温度测量仪(型号: E5AX)的输入。记录仪(型号: LZ3-100)是单笔纸式函数记录仪,实验时需将温度测量仪测到的整数温度值在记录曲线上做标记,以内插得到每个滴的冻结温度。

2 实验过程

首先将整个冷台及其循环散热装置安装在一个通用冰柜中,调整冰柜中温度,将其控制在 $+6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右为宜。把冷台上部分移开,暴露出盛放水滴的下板,用酒精清洗后再用专用扁刷涂布光学硅油,再用 6 号针头的注射器将事先准备好的待测水样均匀地滴在涂布好的硅油中(水滴直径为 2.62 mm ,体积为 $9.42\text{ }\mu\text{L}$)。一个实验过程可滴 40 个水滴,滴完后盖好上部分,启动降温系统和记录仪。此时,处于

冷腔下板上的水滴将随着预先制定的线性降温程序自动降温,水滴群随温度的降低陆续发生冻结,记录仪将自动记录水滴的冻结信号(图 3)。实验中,当温度降到 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后就开始在记录仪纸上标记整数温度值,以便处理资料时内插得到准确温度值。当已出现 40 个“脉冲”信号,表明该次冻结过程已完成。重复以上步骤,再进行下一个过程。一般一种水样做 200 个滴(5 条记录曲线)。

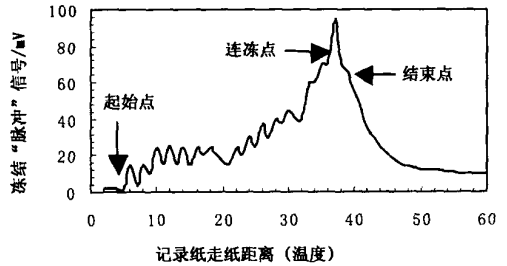


图 3 自动记录的冻滴信号示意图

由实际记录曲线可见,整个曲线随水滴的冻结呈逐步上升的趋势,而且先出现的“脉冲”高度高于后出现的,这是因为先冻结的水滴所释放的潜热得到了冷台及时消耗和制冷功率补充,随着冻结事件频率的增加和随机出现在冷台上的区域不同,传到冷台上的热量累积,加之制冷组件的热惯性,这些热量来不及消耗所致。有时也出现几个水滴几乎同时冻结,反映在记录线上则是连续跃增的线段,此时,需要根据“脉冲”跃增高度人工判别冻结的水滴数。

3 资料处理方法

一个冻结实验过程对应一条记录曲线,水滴冻结温度和冻结个数需人工判读,分别从同一种水样的 5 条记录曲线上读取 200 个水滴的冻结温度,以 $0.25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 间隔统计冻滴个数,记录在专用表格中水滴冻结个数栏内,得到原始的冻结温度谱。对前后相邻间隔冻滴数按 $1/4, 1/2, 1/4$ 作加权平均,为使计算得到整数值,所有水滴均乘以 4,这样相邻温度间隔的加权为 $1, 2, 1$,水滴总数为 800,得到加权平均后的水滴冻结温度谱。加权谱的高温 and 低温段各扩展一个间隔($0.25\text{ }^{\circ}\text{C}$),谱宽增宽 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,因为实验的水滴数是有限的,做加权平均处理可使资料和计算结果更具代表性。然后按 Vali 给出的方法逐步计算,得到水样中的冻结核浓度。

微分浓度表示在某一温度间隔 $\Delta T(0.25\text{ }^{\circ}\text{C})$ 内

水中所含冻结核浓度:

$$k(T) = \frac{1}{VN(T)} \frac{dN}{dT} \quad (1)$$

积分浓度表示高于某温度时水中所含冻结核的累计浓度:

$$K(T) = [\ln N_0 - \ln N(T)] / V \quad (2)$$

两式中 N_0 为同一水样实验水滴的总数 (800), $N(T)$ 为温度 T °C 时未冻结的水滴数, V 是水滴的体积 (0.00942 mL)。每次实验在得到原始冻滴温度谱后,可编制一个简单的程序,由计算机完成上述资料处理、计算和绘图。

4 应用实例

用该装置曾对北京地区 1995 年底到 1998 年出现的各类降水样品进行了实验,其中包括连续性降水,毛毛雨,阵雨,降雪和冰雹^[3]。结果显示出:不

同形式的冻结核其微分和积分浓度随温度的变化都有较明显的差别。作为该装置在本文中的使用示例,图 4 给出了在北京取样的冰雹融化水及雨水的冻结核浓度谱。由图可见,两种水样冻结核浓度的温度谱型有较明显的差异,特别是在较高负温段,冰雹水中的冻结核含量明显高于雨水的冻结核含量。对于其它类型的降水(毛毛雨,阵雨和雪),它们的冻结核含量在温度谱形上也有较明显区别。

结合青海省人工影响天气的外场作业,对催化前后的降水进行了取样并用此装置做了水滴冻结实验,虽然由于在水样的处理中误加了酸,使检测结果受到了一些影响,但从谱的变化上也能分辨出催化前后的不同。此外,还用此装置利用滤膜技术仍以冻滴实验法做过浸入冻结机制的模拟,其资料还有待于进一步的整理分析。

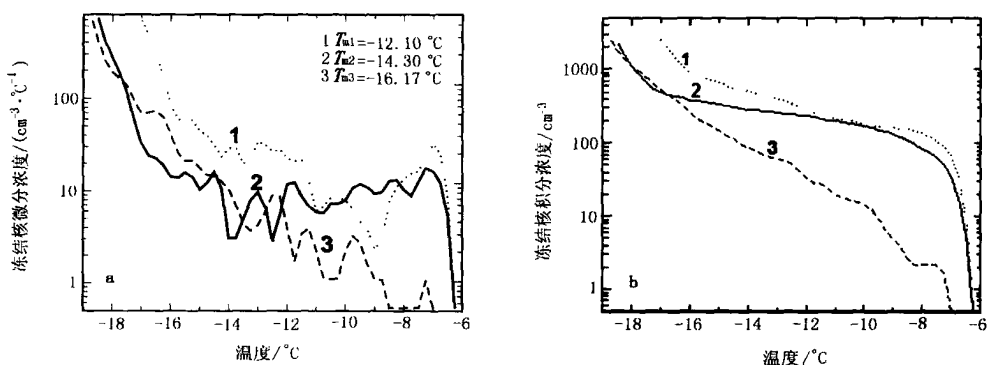


图 4 冰雹融化水及雨水的冻结核浓度谱:(a)微分浓度谱,(b)积分浓度谱

(曲线 1:1996 年 6 月 10 日冰雹水;曲线 2:1997 年 6 月 19 日冰雹水;曲线 3:1997 年 6 月 19 日雨水。

T_{m1} , T_{m2} , T_{m3} 分别为 3 个水样的平均冻结温度)

总之,本装置的初步应用表明:它在大气物理和人工影响天气的研究中具有一定应用价值和开发使用前景。

5 小结

(1) 利用 TEC112703 型半导体制冷组件和液体(乙二醇+水)循环散热技术可以获得 -28 °C 的低温,完全能满足水滴冻结实验的要求。

(2) 利用半导体制冷(帕尔帖效应)的逆过程和水滴冻结释放潜热现象,实现了对一群均匀水滴冻结事件的自动记录。

(3) 由于水滴是在封闭的小冷腔内,减小了水

滴本身的温度梯度,与 Vali 等对体积为 10 μ L 的水滴冻结实验相比,测得的平均冻结温度约低 0.5 °C。

(4) 在智能型控温仪表的控制下,可以实现 1 ~ 3 °C/min 不同速率的线性降温。

(5) 多次实验表明,该装置性能稳定,重复性好。

虽然该装置具有上述性能和功能,但实际使用中仍发现有需要改进之处,如:用于循环散热热交换箱的容积应当加大,否则,当线性降温到低温段时,由于电功率的自动调整,制冷组件热面的热量大大增加,致使循环液温度升高,有时不得不暂停实验等待冰柜对它冷却后再继续进行。另外,从记录纸

上读取冻滴数据仍需人工进行,工作量大而繁琐,如果能对冻滴信号通过某种方法进行转换,利用微机实现自动实时处理,将会大大加快实验进度,提高实验效率。

参考文献

- 1 章澄昌(编著). 人工影响天气概论. 北京:气象出版社, 1992. 10 - 29
- 2 Vali G. Freezing nucleus content of hail and rain in Alberta. J. Appl. Meteor., 1971, 10(1): 73 - 78
- 3 酆大雄,杨绍忠,陈汝珍,等. 水滴冻结实验测量降水物中的冻结核含量. 气象学报, 2002, 60(2): 370 - 377
- 4 Schnell R C. A new technique for measuring atmospheric ice nuclei active at temperatures from -20°C to 0°C , with results. 7th Conf. on Inadvertent and Planned Weather Modification, 1979. 110 - 111
- 5 Wang Mingkang. An analysis of the filter diffusion chamber and drop freezing methods of determining ice nucleus concentrations. Adv. Atmos. Sci., 1985, 2(2): 260 - 269
- 6 Murty A S R, Ramana Murty Bh V. Freezing characteristics of rain water drops with different solutes and their implications on anomalous ice crystal concentration in clouds. Tellus, 1972, 24(2): 150 - 160
- 7 杨绍忠,马培民,游来光. 用滤膜法观测大气冰核的静力扩散云室. 气象学报, 1995, 53(1): 91 - 100

An Improved Device for Drop Freezing Experiment Concerning Rain Enhancement

Yang Shaozhong Feng Daxiong

(Chinese Academy Meteorological Sciences, Beijing 100081)

Abstract: A device for drop-freezing experiment was improved, which consists of the cold-cavity, thermometer, controller of temperature, recorder of signals, cold sink, and environment box. Before the drop-freezing experiment, the water sample to be tested was evenly scattered as several dozens of drops in the cavity over the cold board. The temperature of drops can decrease linearly under auto-control and the drops freeze in succession with decreasing temperature. An array of thermocouple is used to detect the latent heat released by freezing drops and a "pulse" signal of the freezing event can be revealed in real time on a pen-and-ink recorder. After several times of drop-freezing experiments for certain water samples, the freezing temperature spectrum can be obtained. According to the method given by Vali, the concentration of the freezing nuclei for this water sample can be calculated. Using this device, drop-freezing experiments were carried out for several kinds of precipitation water samples in Beijing. The results show that there is obvious difference in temperature spectra of freezing nuclei for different precipitation samples. It will be hopefully used as a new criterion for effectiveness evaluation of weather modification operation.

Key words: drop-freezing, experiment device, concentration of freezing nuclei, rain enhancement