

# 用超声速气流产生冰晶的试验及测定\*

易仕明 鄞大雄 陈汝珍 蒋耿旺

(中国气象科学院, 北京, 100081)

## 提 要

在  $2\text{m}^3$  等温云室中进行了塑料小泡压爆及超声速气流在过冷雾中产生冰晶性能的试验, 在  $-1^\circ\text{C}$  到  $-17^\circ\text{C}$  温度范围内测试其产生冰晶效率。发现这两种方法均能在过冷雾中产生大量冰晶, 直到  $-1^\circ\text{C}$ 。在  $-8^\circ\text{C}$  时每升空气产生的冰晶为  $10^{11}$ — $10^{12}$  量级。是一种经济有效的催化过冷云雾的方法, 很有应用前景。

**关键词:** 超声速气流, 膨胀冷却, 云室试验, 冰核化, 消过冷雾。

## 1 引 言

早在 1948 年 Vonnegut<sup>[1]</sup> 就曾用玩具汽枪在云室过冷雾中发射及小橡皮汽球在云室过冷雾中爆破产生大量冰晶。并认为这是绝热膨胀使温度降到  $-39^\circ\text{C}$  以下使水汽均质核化所致 (Schaefer, 1948<sup>[2]</sup>)。此后, 不少学者进行了类似试验, 其中 Lukow 及 Hicks (1974)<sup>[3]</sup> 在试验中得出, 用两种方法可以产生冰晶, 一是压缩空气的瞬间爆发, 一是使压缩空气通过超声速喷嘴喷出超声速气流。两种方法产生冰晶的效率均很高, 但喷出超声速气流有更多优点。1975 年美国空军 Cambridge 研究所公布了“用压缩空气消过冷雾”的研究报告<sup>[4]</sup>。该报告试验用超声速气流产生冰晶消冷雾获得很好效果, 使这项技术得到实用。1991 年南京大学黄世鸿、李如祥<sup>[5]</sup> 提出超声速气流中的膨胀波能产生远低于均质核化所需温度 ( $-41^\circ\text{C}$ ), 因而能高效地产生冰晶, 给此问题以合理的理论解释。为使这项技术在我国人工影响天气中得到应用, 我们在以上工作的基础上, 在云室中对小塑料泡压爆及超声速气流的成冰效率进行了较精确的测定。此外还在庐山进行了外场试验。结果表明是用 1mm 喷嘴喷气 1 分钟即产生大量冰晶, 数分钟后即扩展到 80m 距离外。

## 2 试验及测定

试验及测定是在中国气象科学院人工影响天气研究所  $2\text{m}^3$  等温云室<sup>[6]</sup> 中进行的。该云室的云室参数测量系统齐备, 性能稳定, 重复性好, 是国内进行冰核检测较好的设备, 为进行本试验, 在原云室中加了一套另行设计制作的超声速气流冰晶发生系统 (见图 1, 图中 1—6 为云室系统; 7—12 为超声速气流冰晶发生系统, 详细说明见后)。雾由超声波雾发生器连续喷入云室, 起始含水量维持在  $2.0$ — $3.0\text{g}/\text{m}^3$  左右, 雾滴的均立方根直径在

\* 1992 年 9 月 18 日收到原稿, 1993 年 2 月 8 日收到修改稿。得到国家气象局云雾物理基金支持。

10—12 $\mu\text{m}$  之间。透明度计的光源及接收器分别安装在云室中部的相对两侧。云室的详细情况见文献[6]。

冰晶计数是，在云室内底侧由一叠载玻片承接云室中下落的冰晶，视冰晶多少每半分钟到 2 分钟取出一片，放在显微镜下的冷台上读数。冷台用半导体降温，使温度保持在 -15 $^{\circ}\text{C}$  左右，湿度接近饱和，在读数短时间内冰晶不致升华或融化。每片得到一个视野的平均冰晶数  $i_n$ ，直到  $i_n$  后无冰晶为止，冰晶总数  $N_i$  为

$$N_i = (i_1 + i_2 + \dots + i_n)A$$

其中  $A$  为云室系数，即云室横截面积相当显微镜一个视野面积的倍数，等于  $1.12 \times 10^6$ ，也即是显微镜下一个冰晶相当云室内  $1.12 \times 10^6$  个冰晶。这是云室对冰晶检测的下限，在我们的试验中一个过程每个视野冰晶的累计数 ( $N_i$ ) 可达数百到数千；超出检测下限  $10^2$ — $10^4$  倍，因此相对误差很小，可以满足试验要求。如果云室中产生的冰晶少，可以加大视野面积或读取多个视野面积求平均来降低检测下限。

试验及测定 1 压破塑料小泡产生冰晶的试验：使用包装精密仪器带小泡的气垫膜，小泡为圆饼形，半径 0.5cm，厚度 0.35cm，因小泡常不十分饱满，计算时取容积为 0.25  $\text{cm}^3$ 。用气垫膜上的一个小泡，装入医用 5ml 注射器(除去针头)伸入云室，压注射器管心使小泡爆破。多次试验，均能目测到云室中产生冰晶。在云室温度为 -2—-16 $^{\circ}\text{C}$  时测定成冰效率，即每次压爆一个小泡，读取总冰晶数  $N_i$ ，照下式计算每升空气产生的冰晶数，即成冰率  $I(1/l)$

$$I = \frac{N_i}{V} = \frac{N_i}{0.00025} \quad (1/l)$$

测试结果如图 2。

试验及测定 2 超声速气流产生冰晶的试验及其效率的测定：制作了几种喷嘴在云室中试验，目测均能产生冰晶。然后主要测量 1mm 直径喷嘴的成冰效率。测量按下列步

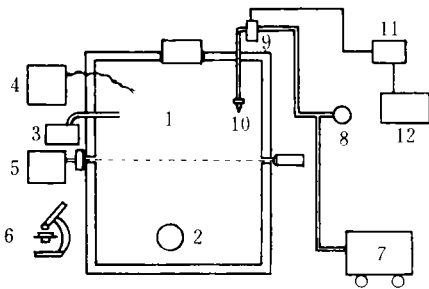


图 1 2m<sup>3</sup> 云室及超声速气流冰晶发生系统 (云室系统：1. 2m<sup>3</sup> 云室，2. 冰晶取样孔，3. 超声波雾发生器，4. 云室温度指示器，5. 透明度计，6. 显微镜；超声速气流冰晶发生系统：7. 空气压缩机，8. 气体压力表，9. 电磁阀，10. 超声速气流喷嘴，11. 同步双开关，12. 精密计时器)

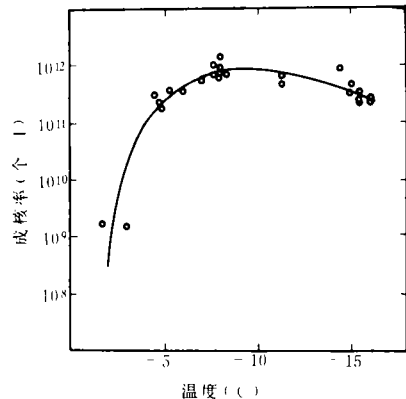


图 2 塑料小泡压爆产生冰晶效率与云室温度关系曲线图

骤进行。

(1)在原  $2\text{m}^3$  云室系统外另行设计制作了“超声速气流冰晶发生系统”,如图 1 中的 7—12。其中 7—10 气流通路均用耐压橡皮管相连。同步双开关 11 能使电磁阀 9 及精密计时器同时启动或关闭。试验时用  $100\text{ms}$  左右通气时间。当开启时,高压气通过电磁阀从喷嘴 10 以超声速速度喷入云室产生冰晶。按前述方法读出冰晶总数  $N_i$ ,然后从表压  $P_i$  及通气时间  $t_i$  求出总通气量  $Q$ ,用下式求出成冰率  $I_i$ ,即每升空气产生冰晶的个数(1/l)。

$$I_i = \frac{N_i}{Q}$$

(2)超声速气流喷出气量  $Q$  的测定:为了确定通过喷嘴进入云室的空气量,需先对喷气系统进行标定,以求出压力(表压  $P_i$ )与单位时间喷气量  $q_p$  的关系。测量时超声速喷嘴不接入云室,而是接入一个缓冲气囊,再接入一个湿式流量计。气囊的缓冲作用,可避免喷气过急受阻。一次喷气后,从流量计读出总流量  $Q$ ,从压力表读出表压  $P_i$ ,从计时器读出通气时间  $t_i$ ,然后计算出单位时间流量  $q_p$ (l/s)。测得的  $1\text{mm}$  口径喷嘴的  $q_p$  与  $P_i$  的关系如图 3。只要知道表压  $P_i$  就能从图中求出相应的  $q_p$ ,然后乘以通气时间  $t_i$ ,就能得出总流量  $Q$ ,即

$$Q = q_p t_i$$

(3)测定成冰率:先使云室降至所需测的温度  $t_i$ ,再开动超声波雾发生器连续通雾,当云室中雾的含水量达到所要求的值时,从云室底侧取样孔中取出 1—2 片载玻片在显微镜下观察,如观察不到冰晶则表明外来核或残存核已全部活化,云室无本底冰晶,即可开始测试。先启动空气压缩机使达到所需测的表压  $P_i$ ,再按同步双开关,此时电磁阀及精密计时器同时开启,经短时  $t_i$  关闭, $t_i$  一般用  $100\text{ms}$  左右,然后由云室内底侧每隔 1—2min 左右逐个取出落有冰晶的载玻片,放在显微镜物镜下的冷台上读数(冰晶多时每片读 1 个视野,冰晶少时每片可读几个视野求出一个视野的平均数  $i_n$ ),直到最后载玻片上无冰晶为止,用所有  $i_n$  得出冰晶总数  $N_i$ 。我们测出  $1\text{mm}$  喷嘴,温度  $-1^\circ\text{C}$  到  $-15^\circ\text{C}$ ,表压分别为 3, 5,  $7\text{kg}/\text{cm}^2$  的冰晶总数,并根据进气量求出每升空气的成核率  $I$ ,得出 3 条曲线,如图 4。此结果与美国空军 Cambridge 研究所的结果基本一致<sup>[4]</sup>。从图上可看出:成冰率不仅与云室温度有关,还与喷嘴的总压有关,也即是与喷口气流速度的马赫数有关,马赫数愈高,效果愈好。

### 3 讨 论

关于空气瞬间爆发及超声速气流能高效地产生冰晶的机理,文献[3]已提到。下面根据我们的试验略加讨论。

当封闭气体在高压下突然爆发,气体以超声速速度冲出时会产生激波及膨胀波,当气流以超声速速度流动时也伴有激波和膨胀波<sup>[7,8]</sup>。在亚声速气流中气体的压缩性可以忽略不计,但在超声速气流中膨胀和压缩均有重要作用。在超声速气流的膨胀波中,气体强烈膨胀,在有的部位(如两膨胀波的相交处)甚至可膨胀到接近真空。因此,膨胀波能使通过气流的温度剧烈绝热下降。气流通过膨胀波时其温度  $T$  为<sup>[8]</sup>:

$$T = T_0 / (1 + 0.2M^2)$$

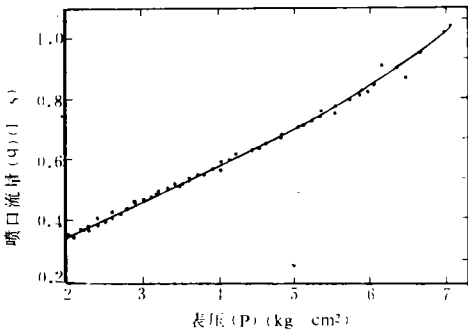


图3 1mm 超声速喷嘴流量  $q_n$  与表压  $P_1$  的关系曲线

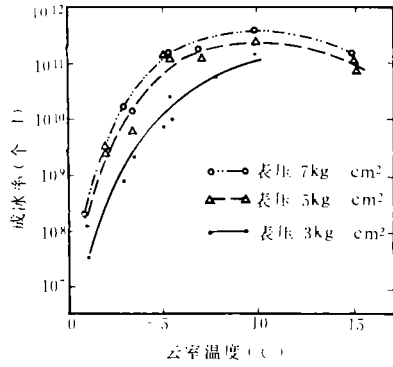


图4 1mm 喷嘴成冰率与云室温度及表压的关系曲线

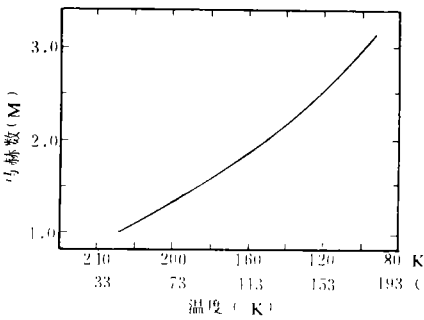


图5 在超声速气流中气流通过膨胀波时温度随马赫数的变化

此处  $T_0$  为总温(或称滞止温度),  $T$  为所计算区的温度,  $M$  为该区的气流速度马赫数。设总温为 273K, 则在各马赫数时的温度  $T$  如图 5 所示。从图上可看出, 当  $M$  为 1 时, 温度降到  $-45^{\circ}\text{C}$ , 已低于均质核化温度  $-41^{\circ}\text{C}$ ,  $M$  为 2 时可降到  $-120^{\circ}\text{C}$ ,  $M$  为 3 时降到  $-176^{\circ}\text{C}$ , 可见膨胀波有强烈降温作用。使用我们的喷嘴, 气流喷出膨胀后达到的马赫数及降达的温度见附表。

由以上原理可见: 当含水汽的空气从超声速喷嘴以 1 马赫以上的速度喷出时能急剧降温, 达到远低于均质核化所需的温度, 从而使空气中的水汽迅速凝华成很多极小的冰胚, 另外还有超声速气流夹卷其周围空气中的水汽使其凝华成冰

胚。这些冰胚在云室的过冷雾中由贝吉龙过程继续长大成冰晶下落而使过冷雾消失。我们不认为超声速气流直接使过冷雾冻结, 因为我们的喷嘴直径只有 1mm, 喷嘴外超声速气流的有效距离不超过数厘米, 不可能使云室中大量雾滴变成冰晶, 顶多使卷入超声速气流中的少数雾滴冻结。在小型混合云室的试验中可以看到: 原先均匀的雾在压破塑料小泡的瞬间或超声速喷嘴喷出一股气时, 先看见一股白色气流冲出, 随即形成不均匀的丝缕结构, 继而看见无数闪闪发光的小冰晶。“白色气流”是最初的冰胚, “丝缕”是略微长大的冰胚, 接下去就是冰晶继续长大的过程。对冰晶的显微观测表明, 绝大多数冰晶中心无冻滴, 表明它们是通过凝华核化, 而不是水滴先冻结再凝华增长的<sup>[9]</sup>。下面一组显微照片(图 6)就是在  $2\text{m}^3$  云室中温度为  $-14.6^{\circ}\text{C}$  时得到的喷气后冰晶产生及长大的过程。

以上说明了超声速气流及气体突然爆发能产生膨胀波, 使气体温度剧烈下降, 从而产生冰胚。但是还有更多的理论及实际问题需要进一步探讨。例如, 以上讨论是假设气体为无粘性的、干洁的理想气体。实际上空气是有粘性的, 特别是我们用的喷嘴直径只有

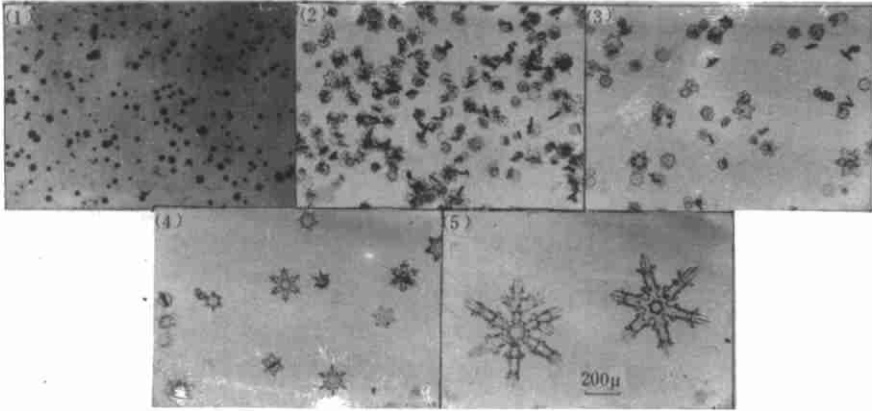


图6 喷气后云室中冰晶发生与增长过程显微照片

(喷气表压  $2.5 \text{ kg/cm}^2$ , 云室温度  $-14.6^\circ\text{C}$ , 喷气时间 110ms.)

①喷气前云室内雾滴照片; ②喷气后 2min 新生冰晶, 均为六角片状晶, 似针形的为直立六角晶; ③3min 后冰晶稍长大; ④4min 后冰晶长大为小雪晶; ⑤7min 后已发展为枝叉完整的小雪晶, 此后冰晶全部落下)

附表

表压( $\text{kg/cm}^2$ )	3	5	7
总压( $\text{kg/cm}^2$ )	4	6	8
气流喷出后的马赫数(M)	1.559	1.828	2.014
气流喷出后降达的温度( $^\circ\text{C}$ )(设总温为 $0^\circ\text{C}$ )	-89	-109	-122

1mm, 粘性更不能忽视, 由于粘性引起的界面混合引入水汽及其中小涡旋对成冰效率有什么影响, 空气中水汽含量, 及冰胚可达到的最小尺度对成冰效率有什么影响都是值得考虑的。此外喷嘴设计也还有改进的余地。

#### 4 应用前景

本方法所用的是随处可见的空气, 成冰效率很高, 特别是在接近  $0^\circ\text{C}$  的负温下也能产生冰晶, 所需空气压力也不大, 一般空气压缩机即可达到, 使用时可连续不断地长时间产生冰晶, 所以是既经济又方便的人工发生冰晶方法, 有广阔的应用前景。例如可在消机场冷雾中应用。美国根据数处野外试验计算, 如用压缩空气代替丙烷消雾, 达到同样效果的费用只为原来的 1/17。在云室中试

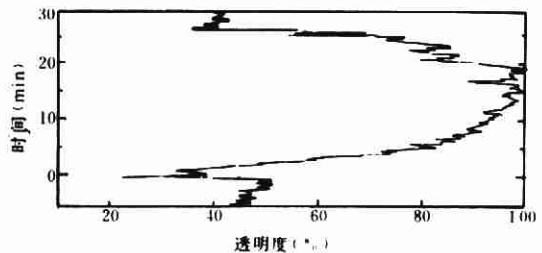


图7 喷气后云室透明度的变化

验, 喷入云室少量超声速空气后, 在通雾不停的情况下, 云室透明度迅速好转, 10—15min 左右透明度从 20%—30% 转好到 90%—100%, 图 7 即为试验中透明度转好的一例。

本方法的原理也有可能应用到一般亚声速飞机上去, 如在机上加上某种增速装置, 利用飞机本身的动力产生局部超声速气流, 从而产生膨胀波降温, 如降温达到均质核化温度, 也可能产生冰晶。

致谢: 在试验工作中得到黄庚、孟迎春同志的大力帮助, 深表谢意。

## 参考文献

- [1] Vonnegut B. Production of crystals by adiabatic expansion of gas. *J of Appl Phys.* 1948. 19(10): 959.
- [2] Schaefer V J. The production of ice crystals in a cloud of supercooled water droplets. *Science.* 1946. 104: 457—459.
- [3] Lukow T E and Hicks J R. Laboratory studies of cold-fog dispersal by compressed air. USA CRREL Research report 327. U. S. Army Cold Regions Research and Engineering Laboratory. Hanover, New Hampshire. 1974.
- [4] Weinstein A I and Hicks J R. Compressed air for Supercooled fog dispersal. AFCRL6TR-75-056. Air force surveys in geophysics. No. 329. USA CRREL. Miscellaneous publication No. MP823. 1975.
- [5] 黄世鸿、李如祥、钱国昌、魏荣爵. 冰晶产生的非催化触发机制研究. *气象学报.* 1991. 49(2): 198—204.
- [6] 鄞大雄、王云卿、陈汝珍、蒋耿旺. 一个用于人工冰核研究的 2m<sup>3</sup> 等温温室. *气象学报.* 1990. 48(1): 72—79.
- [7] (加拿大) 格拉斯, I. I. 著. 董务良等译. 激波和人. 北京. 科学普及出版社. 1984. 103—104.
- [8] 张瑜编著. 膨胀波与激波. 北京. 北京大学出版社. 1983. 43—45.
- [9] Weickmann H K. Katz U and Steele R. AgI-sublimation or contact nucleus? Preprints of the 2nd National Conference on Weather Modification. Santa Barbara California. April 6—9. 1970. 325—328.

# THE EXPERIMENT AND DETERMINATION OF ICE CRYSTAL PRODUCED BY SUPERSONIC AIR FLOW

Yi Shiming Feng Daxiong Chen Ruzhen Jiang Gengwang

(Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing, 100081)

## Abstract

The laboratory experiments were carried out in a 2m<sup>3</sup> isothermal cloud chamber to study the ice nucleating development by bursting small plastic bubbles and by pressed-air spurting out from a nozzle at supersonic speed. The ice crystal number produced by an unit volume of air from temperature -1 to -17°C have been determined. It seems that this technique can provide a promising economic method for cold cloud and fog seeding.

**Key words:** Supersonic air flow, Expansion cooling, Cloud chamber experiment, Ice nucleation, Supercooled fog dissipation.