

冰晶产生的非催化触发机制研究*

黄世鸿 李如祥

(南京大学大气科学系)

钱昌国 魏荣爵

(南京大学声学研究所)

提 要

本文研究了用压缩空气爆破(薄膜爆破,激波管等)和火药爆炸非催化方法触发冰晶产生的作用机制。我们通过大量实验认为超声波和冲击波的作用不一定能够触发过冷水滴冻结,而超声速气流的绝热膨胀冷却作用则是触发冰晶产生的确切机制。然后设计了超声速气流发生装置并在过冷雾中进行触发冰晶产生的实验。结果表明,超声速气流($M=1.1$)触发冰晶产生非常有效。阈温为 -2°C 。冰晶产生的临界压强为 2.1 atm,阈压随实验温度升高而增加,当总压超过阈压 0.2—0.3 atm 时,冰晶大量产生。这些结果与超声速绝热膨胀理论相一致。

一、引 言

人工影响局部天气开展已有 40 多年历史。迄今通过在冷云中播撒干冰和催化剂(AgI, 介乙醛等)方法来达到增加降水的目的,其效果是肯定的。由于使用干冰存在着运输和贮存困难,而使用催化剂也存在若干缺点,如 AgI 价格昂贵,且有一定毒性,而介乙醛、CuS 等的成冰性能较差。因此寻求一种使过冷云滴核化的非催化方法无疑是有重要意义的。

关于触发过冷水核化的非催化方法已有一些实验和野外研究,Vonnegut^[1]在有过冷雾滴的冰箱中发射带有软木塞的玩具枪和爆破直径 1.5 mm 的气球,发现有大量冰晶产生。Goyer 等^[2]作了冲击波触发过冷水滴的实验,认为爆炸产生的冲击波能使之核化。Goyer^[3]在冬季用火药爆炸产生的冲击波对美国黄石公园喷泉进行触发,发现爆炸后立即有冰块降落。中国科学院大气物理研究所曾用激波管产生的冲击波在冷云室中对云滴作用,发现在一定条件下可产生冰晶^[4]。内蒙古自治区在野外用爆炸方法对人造过冷雾进行试验,观测到大多数冰晶是在爆炸后形成的^[4]。超声波在液体中产生的空化作用也能导致过冷水冻结。Hicking^[5]和 Hunt 等^[6]所作的实验得以证实。

冰晶产生的非催化方法对探讨人工降雨新方法有很大启示,颇受人们注意。但多年来,关于这些方法如何触发冰晶产生的确切机制一直众说纷纭,因而也就无法评价它们在实际应用方面的前景。针对这一情况,我们开展了一系列实验研究,旨在搞清过冷云滴在压缩爆破空气(薄膜爆破,激波管等)、炸药爆炸和超声波作用下导致核化的确切机制。

* 本文于 1989 年 8 月 12 日收到,1989 年 9 月 18 日收到修改稿。该课题得到国家自然科学基金支持。

二、触发机制分析

压缩空气爆破、炸药爆炸同时包含下列因素对过冷水滴作用：1. 较大的瞬间压强；2. 超声波的作用；3. 压强降低造成的绝热冷却。由此对冰晶产生出现不同的解释。冲击波机制认为^[7]，由于液体的冰点随压力增加而升高，过冷水滴受瞬间高压作用，通过冻结温度升高而成冰。超声波机制认为^[5]，超声波在过冷水中形成空腔，当空腔崩溃时产生很大的压强(10^4 atm)，使水的冻结温度升高而成冰。绝热冷却机制则认为^[1]，爆破和爆炸后随即发生的降压过程使空气绝热冷却，产生较大温降足以使过冷水滴冻结。为了判断哪一种机制对过冷水滴核化起作用，我们在图3所示的冷室中作了定性实验。冷室温度由温控仪自动控制，一超声雾滴发生器送入众数直径为 $6\ \mu\text{m}$ 的雾滴。在冷室中投一光束以观察冰晶是否产生。

实验1：在冷室中人为地爆破尺度分别为6mm和2mm聚乙烯塑料泡以及直径0.5—5cm的橡皮气球。结果表明，在 -3°C 以下，都能触发大量冰晶产生。

实验2：录制塑料泡爆破时的频谱，然后在过冷雾中加以放大后重放，结果无冰晶产生。

实验3：为进一步试验超声波的作用，在冷室的过冷雾中触发含有丰富频率的电火花，结果无任何冰晶产生。

由此可见，薄膜爆破触发冰晶产生不太可能归之于超声波的贡献。一个基本的事实是，即使空气中有能量相当大的超声频谱，但由于空气和水的声阻抗差别很大，超声波能量难以有效地耦合到水滴中。值得指出的是，至今关于超声空化作用对液体核化的所有实验，都是在大块液体中进行的。

实验4：为检验冲击波的超压效应对触发冰晶产生的效果，我们用发火枪在过冷雾中引发火药爆炸，显然它产生的超压比小塑料泡爆破的超压大得多，但实验结果，没有发现冰晶产生。

有关实验资料表明^[5]，水是一种特殊物质，只有当压力超过2000 atm时，它的冰点才随压力增加而升高，在小于2000 atm范围，其冰点随压力增加反而降低。因此冲击波机制一般地不能对过冷水滴核化起作用。

据上述定性实验和分析，我们认为实验1的结果不一定是由超声波和冲击波的作用产生的。仔细分析压缩空气爆破前后经历的绝热冷却过程表明，若不考虑爆破同时产生的较大气流速度这一重要因素，则理论上是无法得到任何冷却效应。事实是压缩空气爆破时，将产生较大速度的规则运动，其能量是由压缩空气分子无规则运动能量转化而来。气流速度愈大，通过绝热过程产生的温降也愈大。当气流速度达到或超过声速时，气流中将形成膨胀波，气流通过膨胀波，进一步绝热冷却，其效果异常显著，从而导致过冷雾滴核化。

三、压缩理想气体变截面超声速流

压缩理想气体从薄膜泡和激波管以一定速度流至气压为 p_a 的静止空气，若出口处气流的静压 p_1 大于环境气压 p_a ，则气流有一外向折角 δ ，气流作变截面运动，如图1所示。

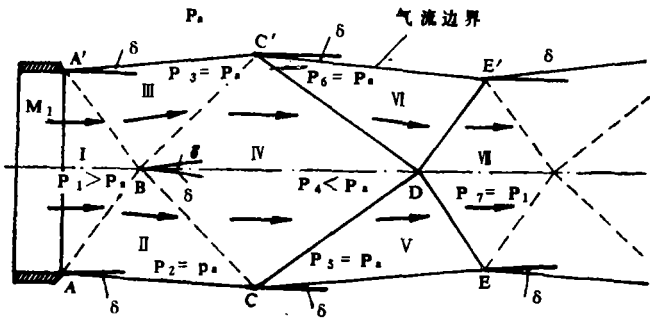


图 1 产生膨胀波的超声速气流

气流截面 A 和折角 δ 的微分表示式为^[7]

$$\frac{dA}{A} = (M^2 - 1) \frac{dV}{V} \quad (1)$$

$$d\delta = \frac{\sqrt{M^2 - 1} dM^2}{2M^2 \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right)} \quad (2)$$

式中 V 为气流速度, M 为马赫数。

由(2)式可知,当 $M < 1$ 时,(2)式无任何意义,所表示的运动情况是,气流离开出口处以后,静压始终与环境压力保持相同,因此无任何扩张与收缩。当 $M > 1$,将给出图 1 的运动图像。对照图 1,由于出口处 $P_1 > P_a$, P_a 将对气流产生一以声速传播的负的弱扰动,但因 $M > 1$,因此该扰动只能影响到气流有限区域,该区域的边界由图中 AB 和 $A'B$ 表示,称之为膨胀波^[8]。波前 I 区气流通过膨胀波到达波后 II、III 区,静压降到 P_a ($p_2 = p_3 = p_a$),而且分别向外折转 δ 角, $dA > 0$,则据(1)式 $dV > 0$,即气流作加速运动, $dM > 0$ 。如果气流按在 II、III 区的运动方向运动下去,则最终将形成夹角为 2δ 的楔形真空,静压进一步降低,将形成新的膨胀波 BC 和 BC' 。气流通过 BC 和 BC' 进入 IV 区, $P_4 < P_a$, V 和 M 数继续增加且各自内折 δ 角。IV 区气流受到 p_a 的压缩,最终形成压缩波 CD 和 $C'D$,气流通过 CD 和 $C'D$ 进入 V 和 VI 区,静压升至 P_a ,流动方向分别内折 δ 角。气流按 V 和 VI 区方向向 D 点辐合,互相压缩,形成新的压缩波 DE 和 DE' ,气流通过 DE 和 DE' 进入 VII 区,恢复到 I 区的状况。之后气流将重复 I 区至 VII 区的过程。由此可见,超声速气流的运动完全不同于亚声速流体。根据它的运动图像, I 区与 VII 区, II、III 区和 V、VI 区的流动参数分别相同, IV 区的速度和 M 数最大。根据流体运力学理论,气流中静压 P 、静温 T 和 M 数之间的关系为^[8]:

$$\frac{T_0}{T} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right) \quad (3)$$

$$\frac{P_0}{P} = \left(1 + \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (4)$$

式中 $\gamma = c_p / c_v$, T_0 和 P_0 为气流总温和总压。

由此可见,在超声速气流中因 M 数不同,绝热冷却产生的温降和压降也不同。需进一步指出的是温降 ($\Delta T = T_0 - T$) 与 M 数的关系。图 2 显示在不同的 T_0 , 由(3)式表示的 $|\Delta T|$ 随 M 数的变化情况。由图可见, M 数对 ΔT 的影响非常敏感, M 数每增加 0.1, ΔT 最少增加 5 K。当 $T = 303$ K, $M = 1.5$ 时, ΔT 超过 90 K, 即是说, 气流温度可降低到 -60°C 以下。可见超声速气流绝热冷却效应是十分有效的。这种冷却效应无疑对冰晶产生起重要作用。下面将根据实验测量数据计算图 1 中各区的温度, 并与冰晶产生与否的实验结果进行对照。

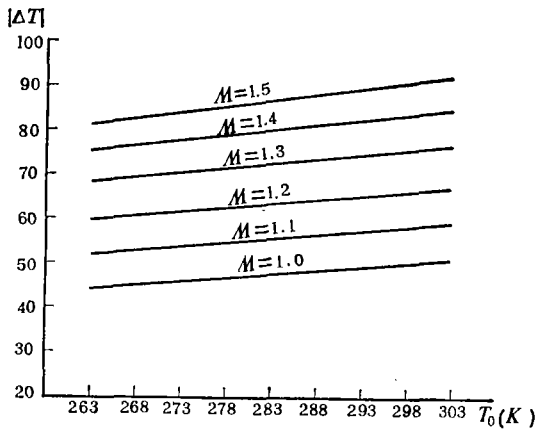


图2 超声速气流绝热冷却产生温度降 ΔT 与总温 T_0 和 M 数的关系

安置实验装置使用。3为箱盖，中间开设一观察窗。4为超声雾滴发生器，产生众数直径为 $6\ \mu\text{m}$ (谱宽 $4\text{--}8\ \mu\text{m}$) 雾滴，由导管送入冷室。5是温度控制仪，用于控制冷室温度。6为贮气箱，通过导管8与压缩机7相连接。贮气箱中的气体由直径 $1\ \text{cm}$ 铜管12导入冷室。9为设于铜管中间的电磁阀门。10为电磁阀门启动按钮。11是电磁阀门电源。13是内径为 $0.4\ \text{cm}$ 、长 $8\ \text{cm}$ 喷管，压缩空气通过它在冷室中产生超声速气流。14为两只压力表，分别测量铜管中气流的总压(P_0)和喷口处的静压(P)。该喷管测量表明 $P/P_0 = 0.47$ ，因此它的 $M = 1.10^{[8]}$ 。

实验按下列步骤进行：在设定冷室温度以后，打开压缩机，使贮气箱气体压强达到一定值(由压缩机所附压力表指示)，然后启动超声雾滴发生器，使雾滴进入冷室，待冷室中悬浮一定量的雾滴后即关闭。开启电磁阀控制开关，开启时间为 $10^{-1}\text{--}2\ \text{S}$ ，此时气体通过喷管进入冷室，读出总压和静压指示。在 $T_0 = 300\ \text{K}$ ，通过反复实验得到如下结果。

1. 当 $P_0 < 2.1\ \text{atm}$ 时，压缩气流通过喷管对 $0\text{--}25^\circ\text{C}$ 过冷雾滴作用后都不能产生

四、超声速流产生冰晶实验

为证实冰晶产生的超声速气流绝热冷却机制，我们设计了超声速气流发生装置，并用它进行触发冰晶产生的实验。实验测量了气流参数，并根据测量参数计算出绝热冷却所达到的温度，对照冰晶发生情况，进一步分析超声速气流对冰晶产生的作用。

整个实验装置示于图3中，图中1为370升冷室，最低温度可达 -25°C ，温度分布较均匀(温差不超过 1°C)。2是直径 $10\ \text{cm}$ 圆孔，分别设于冷室两侧，供

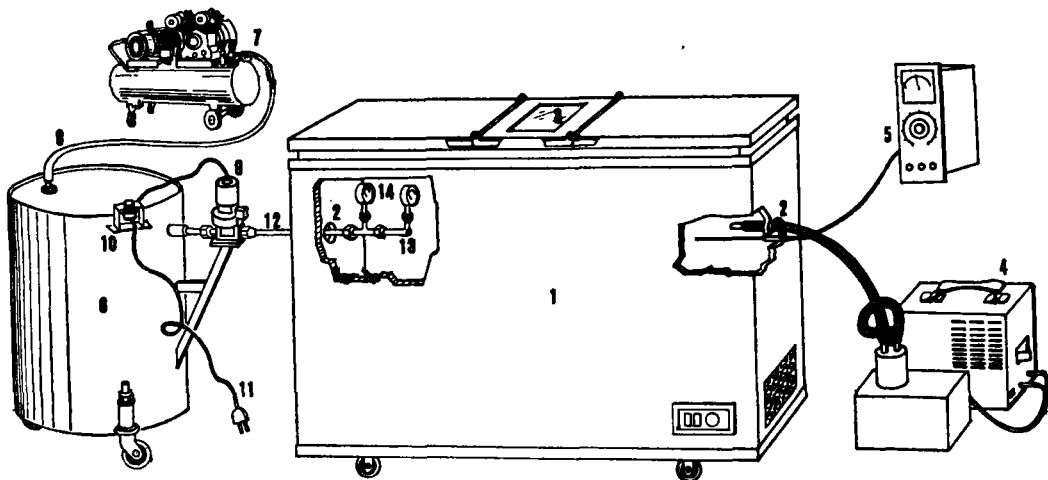


图3 超声速流触发冰晶产生的实验装置

冰晶。我们把 2.1 atm 称为该喷管的临界压强, 记作 P_{oc} 。令人感兴趣的实验数据是当 $P_o > 2.1 \text{ atm}$, 测得 $P > 1 \text{ atm}$; $P_o \leq 2.1 \text{ atm}$, 测得 $P \leq 1 \text{ atm}$ 。这里环境气压 $P_a = 1 \text{ atm}$ 。因此, 当 $P_o < P_{oc}$ 时, 实质上在喷管出口处气流静压 $P < P_a$ 。在此情况下气流截面 $dA < 0$, 因为 $M > 1$, 由(1)式得 $dV < 0$, M 数将愈来愈小, 由(3)式可知, 气流经历增温过程, 这自然不利于冰晶形成。当 $P_o > P_{oc}$ 时, 在喷管出口处 $P > P_a$, 气流将产生图 1 所示的膨胀波, 从而获得有效绝热冷却。这里 $P_{oc} = 2.1 \text{ atm}$ 正是该喷管气流由绝热膨胀向绝热压缩过渡的转折点。这一结果证实了冰晶产生与超声速气流绝热膨胀冷却同时发生, 说明超声速气流的冷却机制对触发冰晶产生的有效性。

2. 我们把某实验温度下, 能产生冰晶的最低总压定义为该温度的阀压, 记作 P_{oi} 。实验结果表明, P_{oi} 随温度升高而略有增加。表 1 给出了各实验温度的 P_{oi} 值, 也列出了利用膨胀波数值表^[8]对不同 P_{oi} 值的气流计算与图 1 相对应各区的参数值。由表可见, 当实验温度低于 -17°C 时, P_{oi} 为 2.1 atm, 气流静温为 -32°C , 而当实验温度为 $-7 \sim -2^\circ\text{C}$ 时, P_{oi} 为 2.8 atm, 气流中最低静温计算值为 -65°C 。计算的静温拟较一般的冰晶产生阀温为低, 而且随着过冷雾温度提高而明显降低。这一现象可能是反映了气流剪切效应对冰晶产生的影响。因为在超声速气流边缘剪切力作用下, 流动空气与静止空气发生混合, 混合后的温度介于气流静温与实验温度之间。过冷雾滴核化需在足够低的温度下实现, 因此若实验环境温度提高, 为了达到过冷雾滴在混合区核化的温度, 需要有较低静温的流动气体参加混合, 这必然要求提高气流总压。参照表 1, 当 $P_{oi} = 2.1 \text{ atm}$ 时, 混合区的温度介于 $-32 \sim -17^\circ\text{C}$ 之间, 这对含有杂质的少数雾滴发生核化是完全可能的。但当实验温度升高至 $-7 \sim -2^\circ\text{C}$, 如果气流静温仍保持 -32°C , 混合后的混合区温度显然难以使过冷雾滴核化。如果要使冰晶产生, 必须有更低静温的气流参与混合。表中表明, 当该气流的静温为 -65°C 时开始观测到冰晶产生。实验结果与过冷水滴核化所要求的温度基本一致。

表 1 各实验温度的 P_{oi} 和气流参数分布值 ($T_0 = 300\text{K}$)

实验温度 ($^\circ\text{C}$)	阀压 P_{oi} (atm)	气 流 区 域														
		I			II, III			IV			V, VI			VII		
		P^*	M	T^{**}	P	M	T	P	M	T	P	M	T	P	M	T
< -17	2.1	1.00	1.09	-32	1.00	1.09	-32	1.00	1.09	-32	1.00	1.09	-32	1.00	1.09	-32
$-17 \sim -12$	2.2	1.03	1.10	-32	1.00	1.10	-33	0.96	1.16	-36	1.00	1.10	-33	1.03	1.10	-32
$-12 \sim -7$	2.5	1.18	1.09	-32	1.00	1.22	-42	0.89	1.31	-52	1.00	1.22	-42	1.18	1.09	-32
$-7 \sim -2$	2.8	1.29	1.10	-32	1.00	1.31	-50	0.79	1.49	-65	1.00	1.31	-50	1.29	1.10	-32

* 单位为 atm, ** 单位为 $^\circ\text{C}$ 。

3. 实验表明, 在一定实验温度, 当 $P_o = P_{oi}$ 时, 仅有少数冰晶产生, 但当 P_o 比 P_{oi} 大 0.2—0.3 atm 时, 冷室中几乎所有过冷雾滴均被核化。这显然是由于 P_o 相对较小的变化引起较大气流静温变化所致。由(4)式可知, 气流 M 数随 P_o 升高而增加。如前所述, M 数对 T 的影响是很灵敏的。计算表明, 当 P_o 从 2.2 atm 升高到 2.5 atm 时, 在图 1 的 IV 区, M 数增大 0.15, 气流静温降低 16°C , 达 -52°C , 在这一低温条件下, 过冷雾滴核化显然是十分容易的。

4. 实验测得成冷阈温为 -2°C 。当实验温度高于 -2°C 时,则任何实验压力产生的超声速气流都没有观测到冰晶产生,原因可能是冰晶在较高的温度下不易增长和存活。

五、总 结

过冷水滴可通过压缩空气爆破(薄膜爆破、激波管等)和火药爆炸非催化方法触发成冰。由于爆破和爆炸同时包含冲击波高压作用,超声波作用和绝热冷却,至今对由这些方法触发冰晶产生的确切机制尚无统一认识,我们通过大量实验认为超声波和冲击波的作用不一定能够触发过冷水滴冻结,而超声速气流的绝热膨胀冷却作用则是触发冰晶产生的确切机制。然后专门设计了超声速气流的实验装置,并用它对过冷雾滴进行触发试验。结果表明,用超声速气流触发冰晶产生非常有效。实验得出冰晶产生的临界压强,阀压随实验温度升高而增加的规律和冰晶数随总压升高而迅速增加的结果,与超声速气流绝热冷却理论是一致的。实验得到过冷雾滴核化的阈温为 -2°C 。

实验结果表明,设定的压缩空气压强仅仅介于 2—3 个 atm,其产生的超声速气流足以触发大量冰晶产生,并且超声速气流可以连续作用,这对探讨人工降雨新方法、新技术显然是颇有价值的。

致谢: 南京航空学院高速空气动力研究所的汪乔森教授、陆建副 教授为研究工作设计和加工了超声速气流发生装置,在此特致谢意。

参 考 文 献

- [1] Vonnegut, B., Productions of ice crystals by the adiabatic expansion of Gas, *J. of Applied Physics*, 19, 10, 959, 1948.
- [2] Goyer, Guy G., Tarani C. Bhadra and Soaia Gitlin, Shock induced freezing of supercooled water, *J. Appl. Meteor.*, 4, 156—160, 1965.
- [3] Goyer, Guy, G. Mechanical effects of simulated lightning Discharge on the water droplets of "OLD FAITHFUL" geyser, *Nature*, 206, 4991, 1302—1304, 1965.
- [4] 黄美元、王昂生等,人工防雹导论, 162—170, 科学出版社, 1980.
- [5] Hicking, K., Nucleation of freezing by cavity collapse and its relation to cavitation Damage, *Nature*, 206, 4987, 915—917, 1965.
- [6] Hunt, J. D., and K. A. Jackson, Nucleation of solid in an undercooled liquid by cavitation, *J. Applied Physics*, 37, 1, 1966.
- [7] 左克罗, M. J. 和 J. D. 霍夫曼, 气体动力学(上册), 128—194, 国防工业出版社, 1984.
- [8] 张瑜, 膨胀波与激波, 256, 北京大学出版社, 1980.

A STUDY OF MECHANISMS ON ICE CRYSTALS GENERATION TRIGGERED BY NON-CATALYSIS METHOD

Huang Shihong Li Ruxiang

(Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University)

Qian Changguo Wei Rongjue

(Institute of Acoustics, Nanjing University)

Abstract

The mechanisms on ice crystals generation triggered by non-catalysis method, including blast by the compressed air (burst of the film and shock tube) and detonation of powder, are investigated. The shock wave-high pressure mechanism and the supersonic cavitation mechanism are preliminarily negated at first based on qualitative experimental while the supersonic adiabatic expansion is considered to be the true mechanism leading to ice crystals generation. Then, a supersonic air flow generator for triggering ice crystals generation in supercooled fog is designed. The experimental results show that a supersonic air flow ($M=1.1$) has a great effect on produce of the ice crystals. The threshold temperature is -2°C . The critical pressure is 2.1 atm. The threshold pressure increase as the experimental temperature increase. A large number of ice crystals are produced when the total pressure is 0.2-0.3 atm higher than the threshold pressure. The results are consistent with the theory on supersonic expansion.