

杨绍忠,陈跃,2018. 一种纳米纯 AgI 气溶胶的制备方法及其成冰核活性的检测[J]. 气象,44(3):442-448.

一种纳米纯 AgI 气溶胶的制备方法 及其成冰核活性的检测^{*}

杨绍忠 陈 跃

中国气象局人工影响天气中心, 北京 100081

提 要: 将 100 mg 纯 AgI 粉末置于一个气氛炉的汽化管内加热到 1600℃ 使之汽化, 再利用高压空气将气态 AgI 爆冲到一个容积为 2 m³ 的金属容器里, 骤冷后形成 AgI 气溶胶。用碳支持膜对形成的 AgI 气溶胶粒子自然沉降取样, 然后用 X 射线衍射仪和电镜检测其成分和粒子尺度。检测表明: 粉末状纯 AgI 经汽化—冷凝产生的气溶胶其成分仍为纯 AgI, 粒子尺度在 0.84~34.6 nm, 峰值直径约为 2.17 nm。为了验证产生的纳米纯 AgI 气溶胶在冰核化中是否具有成冰核活性, 用 15 L 混合云室分别在云室中有冷雾和无冷雾两种条件下定量注入纳米纯 AgI 气溶胶, 检测了它们在不同温度下的成冰核效率, 检测结果是: 在云室中有 -10℃ 冷雾时, 成核率为 1.1×10^{11} 个 \cdot g⁻¹, 在云室中 -10℃ 无冷雾时, 成核率约为 3.4×10^{10} 个 \cdot g⁻¹。

关键词: AgI, 汽化—冷凝, 气溶胶, 成冰核检测

中图分类号: P48

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.03.011

Preparation of Pure AgI Nano-Aerosol and Its Efficiency of Ice Nucleation in Laboratory Experiment

YANG Shaozhong CHEN Yue

Weather Modification Centre, CMA, Beijing 100081

Abstract: The 100 mg pure AgI powder was placed in a vaporization tube of an electrical heating furnace and heated to 1600℃ for gasification. Then, the gaseous AgI was burst into a 2 m³ metal container by high-pressure air, and AgI aerosols were formed after suddenly cooled afterward. AgI aerosols were sampled by natural sedimentation using the formvar stabilized with carbon support films. The results indicated that the aerosol composition maintains pure AgI and the size spectrum width is 0.84—34.6 nm with 2.17 nm peaking diameter. The ice nucleation efficiency of the quantitative pure AgI nano-aerosol was detected by a 15 L mixed cloud chamber, with and without fog, respectively. The preliminary results were that the efficiency of ice nucleation is little more than 1.1×10^{11} g⁻¹ under the condition of -10℃ with cold fog, and 3.4×10^{10} g⁻¹ without cold fog.

Key words: AgI, vaporization-condensation, aerosol, ice nucleation detection

引 言

对于 AgI 粒子的成冰核活性, 许多研究者针对

AgI 粒子的发生方法、纯度、粒子尺度与其活化条件的相关性等方面都曾做过大量的试验研究, 并取得了具有科学研究意义和实用价值的结果, 如: 根据理论计算可知(Fletcher, 1958), 对于凝华和凝结—冻

^{*} 国家自然科学基金项目(41175123)资助

2017 年 3 月 25 日收稿; 2017 年 12 月 31 日收修定稿

第一作者: 杨绍忠, 主要从事云物理和云催化剂的室内实验及相关仪器设备的研发和应用. Email: 13522696085@163.com

通信作者: 陈跃, 主要从事云物理机制研究. Email: chen Yue@cma.gov.cn

结而言,直径为 20~200 nm 的粒子,其尺度对成冰核活性的影响非常明显,大于这个范围,成冰核活性基本与粒子大小无关,而小于时则显著降低。另外,成冰核物质的纯度与其成冰核活性也有密切关系,在 -10°C 时,纯 AgI 的成冰核效率仅为常规 AgI 的百分之一(Corrin et al,1967),说明杂质的加入有助于提高粒子的成冰核活性。对此,其他研究者也有相同的试验结果,纯 AgI 比商品 AgI 的成冰核率低(Steele and Krebs,1967)。也有人用不同方法制作高纯度且粒径小的 AgI 粒子样本并检测它们的成冰核效率,如:对 AgI+胺的合成物加热,可以产生数十纳米的 AgI 粒子(Gerber,1972),活化试验表明,产生的 AgI 粒子中只有一部分活化。粒子 $\leq 20\text{ nm}$ 在 -20°C 和粒子 $\leq 25\text{ nm}$ 在 -15°C ,均未发现有活化的 AgI 粒子。用高温汽化纯银(Ag)后再通入纯碘(I)蒸汽的方法可制成纯 AgI 气溶胶(Poc and Roulleau,1975),其浓度为 $1\times 10^6\sim 5\times 10^6\text{ 个}\cdot\text{cm}^{-3}$,直径范围为 $1\sim 3\text{ nm}$ 。用混合云室检测了冻结核浓度,在 -20°C 时为 $2\times 10^{14}\text{ 个}\cdot\text{g}^{-1}$,高于 -20°C 时,成冰核活性极不活跃。再如:将洁净干空气流经一个 AgI 熔融池子的上方也可以得到纯 AgI 气溶胶(Langer et al,1978),对该方法形成的纯 AgI 气溶胶的成冰核活性检测发现,直径 $10\sim 20\text{ nm}$ 的 AgI 粒子活化性能与粒子尺度有非常强的相关性,约 10 nm 的粒子不能通过接触冻结活化并认为造成这一现象可能的原因是活化点减少和碰并效率降低,另外,在该试验条件下,云室过饱和也不足以通过凝结而活化这些粒子。在近代,随着纳米科技的发展,液相沉淀法在制备纳米 AgI 粉末中得到了应用,该方法得到的纯 AgI 粉末的粒径为 $20\sim 60\text{ nm}$ (张景红等,2010),在 20 m^3 的爆炸室内逐一引爆分别装有 1 g 常规 AgI 粉末和纳米 AgI 粉末的 37 型弹丸,用 20 L 混合云室和 1.2 m^3 等温云室对爆炸形成的烟雾粒子做了成冰核活性的检测对比及分析(金德镇等,2012a;2012b),结果表明:在 -10°C ,装有纳米 AgI 粉末的成核率约为 $4\times 10^{12}\text{ 个}\cdot\text{g}^{-1}$,比常规 AgI 粉末的约高两个数量级。该作者对此差异的解释是,由于数十纳米的 AgI 粒子的晶格常数更接近于冰,具有较高的吸附能力和比表面积所致。

综上所述,涉及 AgI 粒子活性的试验研究,正如梅森(1979)第四章分析总结的那样,“不同研究者的结果之间往往不一致,其原因在于以下几个因素

中间有一个或几个因素彼此不同:对于开始核化所采用的判据;用于检测冰晶的技术的灵敏度和可靠性;核的浓度和大小;观测空间的体积和一次试验中观测的冰核总数;粒子所承受的过饱和程度和持续时间;核在水中的溶解度和溶解率;粒子的晶体结构和表面结构、有利于核化的位置以及杂质的存在等。所有这些因素都可能与准备试验的方法有关。然而对这些因素做了适当考虑以后,要排除一般文献中出现的十分矛盾的结果还是有困难的,例如某一次试验所报道的具有高活化能力的一些物质,在另一个试验中却发现它们完全是不活化的”。尽管如此,若只针对粒子尺度的大小对成冰核活性的影响而言的试验研究,多年来的一个基本共识是:AgI 气溶胶粒子的成冰核活性随粒子尺度增大而增强,大体上,直径大于 200 nm 的 AgI 成冰核活性较为稳定,直径小于 20 nm 后就难以起到冰核作用了(杨军等,2011;苏正军等,2010)。但是,近代纳米材料研究领域认为:随着粒子尺度减小,比表面积增加。表面原子数越多,原子配位不饱和性可导致大量的悬键和不饱和键,使这些表面原子具有更高的表面活性,吸附能力和催化性能也随之增强(张梅等,2000;翟庆洲,1998;陈万奎和严采繁,1991)。据此推测,尺度为数纳米的 AgI 粒子是否完全不具有成冰核活性,还需要更多更深入的试验、求证。为进一步了解纳米纯 AgI 气溶胶粒子是否还具有成冰核活性,本文用汽化—冷凝的方法制备了纳米纯 AgI 气溶胶,并分别做了云室有冷雾和无冷雾两种条件下成冰核效率的检测。

1 纳米纯 AgI 气溶胶的制备方法

根据 AgI 的理化性质可知,若在密闭的容器中把 AgI 粉末升温到沸点(1506°C)以上就能使其相变为气态,然后再将气态的 AgI 突然暴露到远低于沸点温度的环境中,由于急剧降温,气态的 AgI 应该能以凝华机制再相变为气溶胶尺度的固态质粒。根据这一思路,研制并使用了以下主要试验设备(图1)。

1.1 气氛炉

气氛炉是用来把固态 AgI 加热并相变为气态的高温炉,其炉腔是一个水平放置的长方体形的耐高温腔体,在两个最小相对腔壁的中部横穿一根长 850 mm 、外径 30 mm 、内径 24 mm 的耐高温汽化

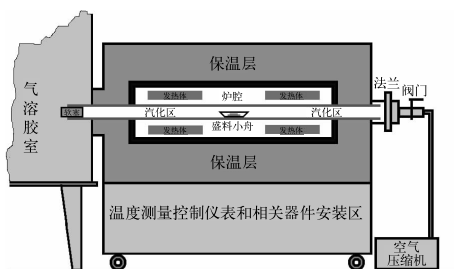


图1 纳米纯 AgI 气溶胶制备设备示意图

Fig.1 Schematic diagram of pure AgI nano-aerosol preparation device

管,管的一端经隔热处理经管道与空压机出气嘴连接,另一端则直接插入气溶胶室的入口。该气氛炉最高温度可达 1650℃,根据试验需要,可通过编制程序实现升温或维持在某个温度值及其维持时间的自控。为保证 AgI 样本完全汽化,本文实用的目标温度设为 1600℃。另外,为尽量减少气态 AgI 在汽化管内壁的吸附性和外溢损失,在汽化管的出口端设置一个软性密封塞。

启动运行之前,先用万分之一精度的电子天平称取 100 mg 化学纯的 AgI 粉末置入一个专用小舟里,再将小舟推入耐高温汽化管内的汽化段内,完毕后在耐高温汽化管的出口堵上一个软性密封塞子,最后将其对准下述的气溶胶室的入口(周边密封),待启动运行。

1.2 气溶胶室

气溶胶室是用来接受来自气氛炉的气态 AgI 并速凝为 AgI 质粒的圆柱形容器,其筒壁均由不锈钢板围制而成,容积为 2 m³。在筒壁不同位置上开有多个孔,分别用于碳支持膜或其他相关装置的置入、激光器观察、注雾调整湿度和清除报废粒子等。

试验前,须用湿润的拖布反复擦洗气溶胶室的内表面,再封闭运行静电除尘循环装置约半小时(期间,用激光器监视,直到看不到激光束),以清除气溶胶室内的本底粒子。在气溶胶室内下部的圆柱形金属台面上放置数枚碳支持膜用来承接自然沉降的 AgI 气溶胶粒子。关闭所有向外的通路,封闭待用。

1.3 空气压缩机

它的作用是产生并储存高压空气,通过管路与气氛炉汽化管的进气端相连。当温度达到 1600℃ 时,突开阀门,在高达 7 个大气压力的作用下,事先

堵在 AgI 汽化管出口端的软性塞子连同管内气态 AgI 一起被爆冲到气溶胶室里,完成从气态到固态的相变,得到试验用的纯 AgI 气溶胶。空压机型号为 Z-400-6L 无油空气压缩机,最高压力可达 8 个大气压。

1.4 AgI 汽化量的确定

鉴于气溶胶室的容积仅为 2 m³,如果 AgI 汽化量太大了,产生的气溶胶粒子数浓度高,容易造成粒子的团聚。如果太小了,在做较高负温段冰核化测试时需要加大样本的注入量,容易使云室内形成高度过饱和而影响模拟的冰核化机制的稳定性及成冰核效率。为此,需要一个适当的量。通过多次不同汽化量的试验后确定:本文实用量均为 100 mg,既兼顾了试验温度段冰核化检测需要,同时对粒子的团聚程度也有所抑制。

2 纳米纯 AgI 气溶胶的电镜检测

用上述设备和方法制备的 AgI 气溶胶粒子被储存在气溶胶室中,在静置状态下,粒子可通过重力作用自然沉降到事先放置在下部的 5 枚碳支持膜上,约 1 h 后取出碳支持膜,交由专业单位做化学成分、粒子形貌和尺度的检测。

检测单位是北京中科百测技术服务有限公司。本文用到的仪器型号及相关参数为:扫描电镜型号为日本日立公司的 S-4800,工作电压为 3 kV。透射电镜型号为日本 JEM-1200EX,加速电压为 100 kV;X 射线粉末衍射仪为德国布鲁克 D8 ADVANCE,加速电压为 40 kV,电流为 40 mA。所用的这些检测设备是目前对粒子成分、粒子形貌及尺度检测的通用标准设备,具有较好的可重复性和可靠性,完全能满足本文对试验样本检测的要求。下面是根据北京中科百测技术服务有限公司提供的检测报告整理的检测结果。

从图 2 可以看出,整个视野中分布着不同大小和形状的粒子。这些粒子中,小尺度的近似为球形,大尺度粒子则形貌差异明显。采用粒度分析软件测量图中的每一个粒子直径(注:明显的非球形团聚体按最大尺度方向测量),得出如表 1 的统计结果。从表 1 可见,小于 7 nm 的粒子数占总粒子数(406 个)的 95.3%,那些可辨认的团聚性大粒子数量占比很小,在 7~35 nm 范围内的总占比仅为 4.7%。团聚

性大粒子的构成可以从图 3 清楚地看到,它们包含着许多个大小不一的小粒子,据此推测,再小一些的尽管肉眼观测近似为圆形但可能还会是团聚性的,但小到什么程度才可视作最小粒子,本文未做此检测。用X射线衍射仪得到的衍射图谱(图4)表明,

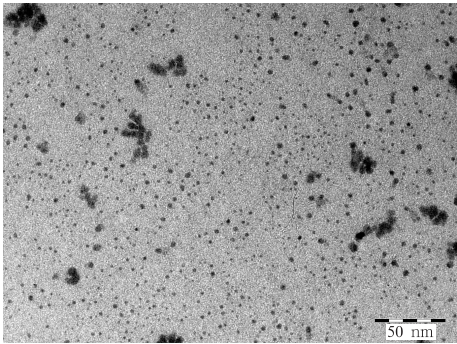


图 2 透射电镜检测的自然沉降在碳支持膜上的纯 AgI 气溶胶粒子形貌和面密度
Fig. 2 Morphologies of the pure AgI nano-particles

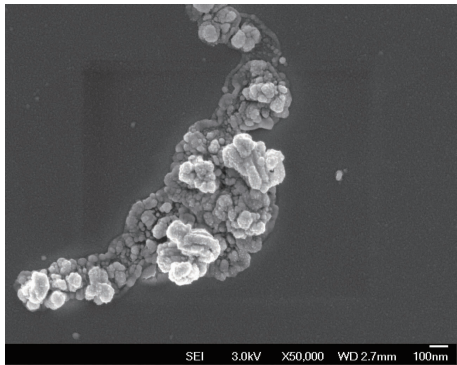


图 3 用扫描电镜针对图 2 中某个团聚性大 AgI 粒子的放大图像
Fig. 3 Enlarged image of one big particle in Fig. 2

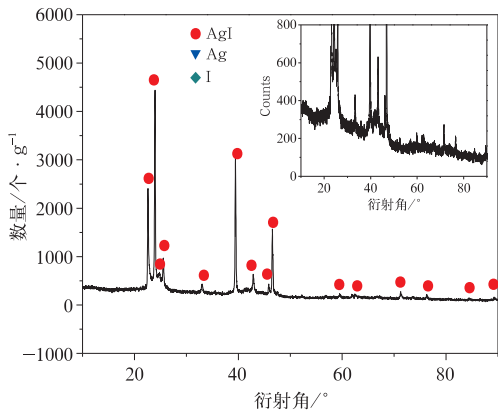


图 4 纳米纯 AgI 气溶胶粒子的 X 射线衍射图
Fig. 4 X-ray diffraction patterns of pure AgI nano-particles

AgI 通过汽化—冷凝过程形成的仍是纯 AgI,未检测到单质 Ag 和 I。图 5 是根据表 1 以 3.5 nm 为间隔做的粒子数量占比条图。

3 纳米纯 AgI 气溶胶的成冰核效率

3.1 云室中有冷雾条件下成冰核效率的检测

检测是用可提供过冷雾的 15 L 云室(杨绍忠等,2007)做的,检测步骤为:把云室拉冷到所需温度→通入过冷雾→用注射器定量抽取 AgI 气溶胶样本并注入云室→顺序暴露事先放在云室底部的玻片,接取形成的冰晶→用显微镜对每个玻片多个视野的冰晶照相→统一分析处理(冰晶计数、形状观察和成核率计算等)。

冰核化机制分析:从操作过程可知,AgI 气溶胶样本是在云室中已存在过冷雾时注入的,气溶胶粒子与过冷雾滴随机接触而发生冻结核化,该过程为接触冻结核化过程,但由于注射器注入的气溶胶样

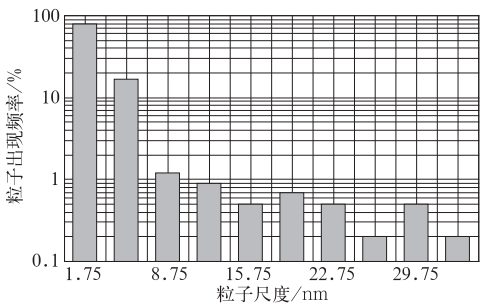


图 5 从图 2 读取的纳米纯 AgI 气溶胶粒子尺度分布
Fig. 5 Size distribution of the pure AgI nano-particles in Fig. 2

表 1 自然沉降的纳米纯 AgI 气溶胶粒子计数统计
Table 1 Statistics of the pure AgI nano-aerosol particles after natural sedimentation

尺度段/nm	个数	占比/%
0~3.5	334	78.40
3.5~7	72	16.90
7~10.5	5	1.17
10.5~14	4	0.94
14~17.5	2	0.47
17.5~21	3	0.7
21~24.5	2	0.47
24.5~28	1	0.23
28~31.5	2	0.47
31.5~35	1	0.23

本温度为室温,样本温度与过冷雾温度两者的差异可造成云室中随温度降低而加大水面过饱和度,故存在凝结—冻结的核化条件,因此从严格意义上,整个检测所模拟的冰核化机制只能称之为以接触冻结为主,并非是单一的接触冻结。

成核率的计算:一个冰晶视为一个冰核粒子,按 $\mu = (N_0 AB) \cdot m^{-1}$ 计算。式中, μ 为成核率(单位:个 $\cdot g^{-1}$); N_0 为读取的每个玻片中多个视野冰晶数平均后的总和(单位:个); A 为云室截面积 S_1 与显

微镜视野面积 S_2 之比; B 为气溶胶室容积 V_1 与注样量 V_2 之比; m 为汽化碘化银质量(单位: g)。

按上述的检测步骤和模拟的冰核化机制下形成的冰晶形状如图 6 所示。纳米纯 AgI 气溶胶生成的冰晶形状与常规 AgI 的冰晶形状相似,低温段呈典型的六角板状,随温度升高向枝星状转变,高温段呈线轴状。在 -10°C ,成核率约为 1.1×10^{11} 个 $\cdot g^{-1}$ (图 7),比金德镇等(2008)在 -10°C 时检测的装有 1 g 纳米 AgI 粉末(20~60 nm)的成核率低 40 倍

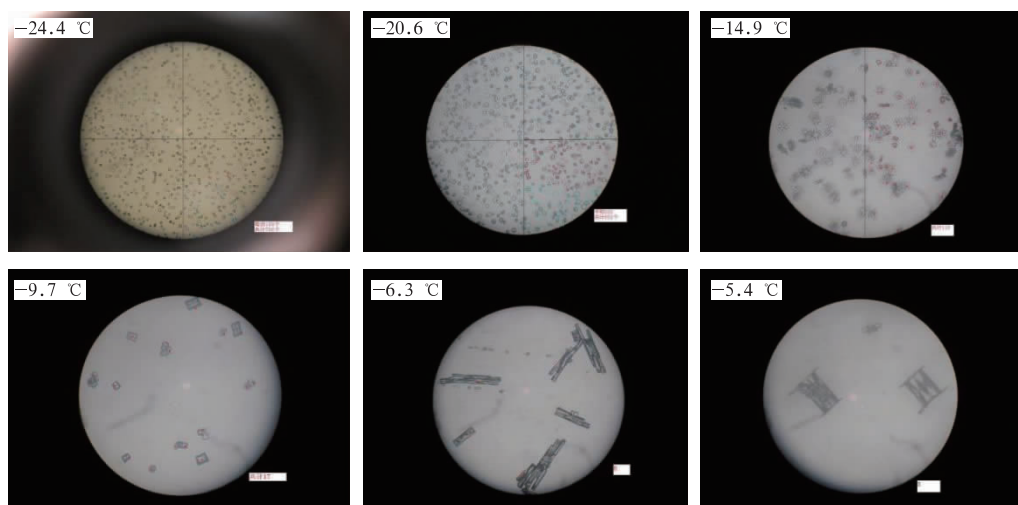


图 6 云室中有冷雾条件下注入纯 AgI 气溶胶粒子形成的冰晶

(图中所示为 6 个不同云室温度的显微镜视野,视野中的十字线和红点是读数时人为做的标记,以防漏记)

Fig. 6 Ice crystal formed from the pure AgI aerosols in the cloud chamber with cold fog introduced

(The six visual fields are in the different cloud chamber temperatures, the cross and red points are the markers during the counting)

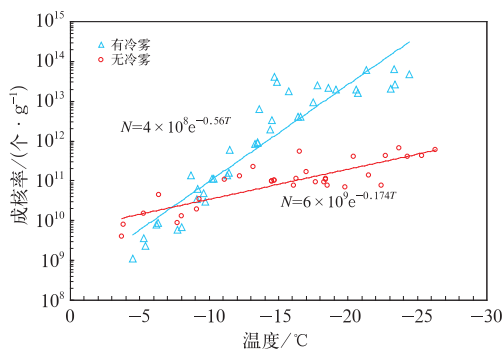


图 7 云室中有冷雾(蓝色)和无冷雾(红色)两种条件下纯 AgI 气溶胶的成核率温度谱

Fig. 7 Comparison of efficiencies spectrum of pure AgI ice nucleation for the cloud chamber with (blue triangle)/without (red circle) cold fog

之多,比 Steele and Krebs(1967)约低 3 个数量级。在 -20°C ,比 Poc and Roulleau(1975)的结果约低 1 个数量级。

3.2 云室中无冷雾条件下成冰核效率的检测

无冷雾条件下成冰核效率的检测也是用 15 L 混合云室做的,检测步骤为:先将云室拉冷到比实用温度约低 2°C 时停机。云室内壁涂布乙二醇,过量通入过冷雾,封闭云室盖,静置 3~4 h(待雾滴全部消散,清除云室内本底核),定量注入 AgI 气溶胶样本,再按上述有冷雾条件下的检测步骤进行冰核效率的检测。

云室温度的调整和注样量:云室制冷压缩机在封闭静置时间内处于停机状态,云室温度会自然回

升,若发现比希望温度值偏离较大时,可在云室原封闭状态下再次启动云室制冷压缩机降温,使其降至所需要的温度值。另外,根据以往对某种气溶胶在不同冰核化机制下成核率的认识,AgI 气溶胶的注入量需要随云室温度的升高逐步加大,以保证每个显微镜视野内有合适的冰晶数量及分布,一般控制在每个显微镜视野中有几个至数十个冰晶较为合适(本文注入量的调整见表 2)。

冰核化机制分析:定量注入 AgI 气溶胶样本前,用激光器(波长为 $532\pm 10\text{ nm}$,功率为 50 mW)照射云室腔,只见照射的激光点,看不见激光束,表明云室中没有雾滴对激光的散射,即:云室内的湿度应处于水面欠饱和。此时注入与云室等温的 AgI 样本,若有冰晶形成则是凝华核化所致。实际操作时,注入样本的温度为室温,由于样本温度与云室温度之差,以及随注入量的加大,不同温度下的湿度并

不能保证都低于水面饱和,因而有可能出现凝结—冻结核化,因此,在云室内无冷雾条件下注入室温气溶胶样本的检测不可能实现单一的凝华核化机制的模拟。成核率的计算方法与云室中有冷雾时的计算方法相同。

按以上检测步骤和定性湿度条件下检测到的冰晶如图 8 所示。从冰晶形状上看,低温时形似空中飞鸟,温度再升高,逐渐长成刺棒状或乱枝状,到更高负温时,看上去又像是什么飞虫,这种形状的变化以前没有看到过,也没有看到规则的六角板状和枝星状以及柱状冰晶。用游来光等(1989;1992)、酆大雄等(1990)根据晶心形状来判断是凝华核化还是凝结—冻结核化的方法观察每个冰晶,因图像清晰度不好,有的似乎是滴心,有的像是晶心,故无法确定是凝华核化还是凝结—冻结核化及两者的比例。在 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$,汽化—冷凝法产生的纳米纯 AgI 气溶胶成

表 2 云室中无冷雾条件下 AgI 气溶胶的注入量

Table 2 Injection amount of AgI aerosols in the cloud chamber without cold fog

云室温度/ $^{\circ}\text{C}$	-26.3	-24.3	-19.8	-18.4	-12.2	-8.0	-5.3	-3.7
样本注入量/ml	50	50	60	80	270	300	500	500

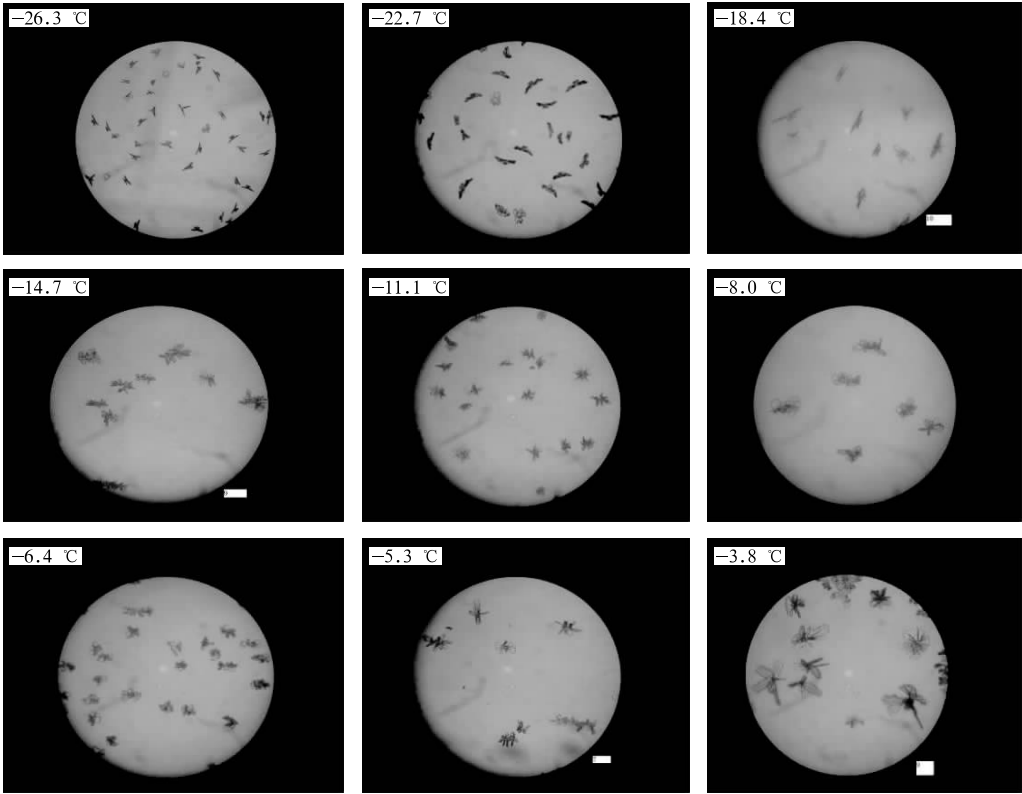


图 8 云室中无冷雾条件下注入纯 AgI 气溶胶粒子形成的冰晶

Fig. 8 Ice crystal formed from the pure AgI aerosols in the cloud chamber without cold fog

核率为 3.4×10^{10} 个 $\cdot \text{g}^{-1}$ (图 7), 该结果与 鄧大雄等(1990)和 鄧大雄(1991)用 2 m^3 云室对“三种含 AgI 的气溶胶在水面欠饱和条件下成冰性能的试验研究”相比, 低于其中 $\text{AgI} \cdot \text{AgCl} \cdot 4\text{NaCl}$ 复合核 -10°C 时的成核率(约 10^{12} 个 $\cdot \text{g}^{-1}$), 而生成纯 AgI 核的 $\text{AgI} \cdot \text{NH}_4\text{I}$ 和 $\text{AgI} \cdot \text{AgCl}$ 两种气溶胶在 -10°C 均未检测到冰晶。

4 结 论

用本文介绍的对 AgI 做汽化—冷凝处理的设备和方法可以获得纳米纯 AgI 气溶胶。电镜检测表明: 当 AgI 汽化量为 100 mg 、汽化温度为 1600°C 、气溶胶室容积为 2 m^3 、爆冲气压为 7 个大气压时, 形成的纯 AgI 气溶胶粒子尺度范围为 $0.84 \sim 34.6 \text{ nm}$, 峰值直径约为 2.17 nm 。直径 $\leq 10.5 \text{ nm}$ 的粒子的占比达到 96.5%, 大于该尺度的粒子仅占 3.5%, 这些为数不多形状各异的大粒子都是由难以计数的多个小粒子团聚形成的。

将 15 L 混合云室的湿度分别控制为有过冷雾和无过冷雾两种湿度, 在这两种湿度条件下检测本文制备的纳米纯 AgI 气溶胶的成冰核效率, 结果是: 有过冷雾时成冰核效率与活化温度的相关为 $N = 4 \times 10^8 e^{-0.56T}$, 在 -10°C , 成核率约为 1.1×10^{11} 个 $\cdot \text{g}^{-1}$; 无冷雾时成冰核效率与活化温度的相关为 $N = 6 \times 10^9 e^{-0.174T}$, 在 -10°C , 成核率约为 3.4×10^{10} 个 $\cdot \text{g}^{-1}$ 。与前人的相似试验相比没有发现更高的成冰核效率, 也没有检测到温度高于 -3.5°C 形成的冰晶。

参考文献

陈万奎, 严采繁, 1991. 碘化银粒子在 -4°C 层以下云中的损耗[J]. 气象, 17(9): 15-20.
 鄧大雄, 1991. 燃烧 AgI 丙酮溶液产生冰核气溶胶[J]. 气象, 17(3): 3-8.
 鄧大雄, 陈汝珍, 蒋耿旺, 等, 1990. 三种含 AgI 的气溶胶在水面欠饱和条件下成冰性能的实验研究[J]. 应用气象学报, 1(1): 57-62.
 金德镇, 张景红, 江中浩, 等, 2012a. 纳米碘化银在人工影响天气的应用研究 I: 理论分析结果和展望[J]. 气候与环境研究, 17(6):

666-670.

金德镇, 张景红, 江中浩, 等, 2012b. 纳米碘化银在人工影响天气的应用研究 II: 室内实验[J]. 气候与环境研究, 17(6): 671-677.
 金德镇, 张景红, 杨绍忠, 等, 2008. 人工影响天气纳米碘化银催化剂成冰性能研究[C]//第十五届全国云降水与人工影响天气科学会议暨中国人工影响天气事业 50 周年纪念大会论文集. 长春: 中国气象学会, 中国气象科学研究院, 中国气象局: 398-401.
 [英]梅森 B J, 1979. 云物理学[M]. 中国科学院大气物理研究所译. 北京: 科学出版社: 154-234.
 苏正军, 郑国光, 关立友, 2010. 人工冰核的核化速率实验[J]. 气象, 36(11): 46-49.
 杨军, 陈宝君, 银燕, 等, 2011. 云降水物理学[M]. 北京: 气象出版社: 119-149.
 杨绍忠, 楼小凤, 黄庚, 等, 2007. 一个观测冰核的 15 L 混合云室[J]. 应用气象学报, 18(5): 716-721.
 游来光, 李炎辉, 刘玉宝, 1992. 自然云中冰晶生成的核化过程及雪晶对过冷云滴的撞冻[J]. 气象学报, 50(2): 232-238.
 游来光, 王守荣, 王鼎丰, 等, 1989. 新疆冬季降雪微结构及其增长过程的初步研究[J]. 气象学报, 47(1): 73-81.
 翟庆洲, 1998. 纳米材料研究进展 I: 纳米材料结构与化学性质[J]. 化学研究与应用, 10(3): 226-235.
 张景红, 金德镇, 江中浩, 等, 2012. 纳米碘化银在人工影响天气的应用研究 III: 表征实验研究[J]. 气候与环境研究, 17(6): 678-682.
 张景红, 金德镇, 刘先黎, 等, 2010. 人工影响天气纳米碘化银催化剂的制备及表征[J]. 吉林大学学报(工学版), 40(1): 77-81.
 张梅, 陈焕春, 杨绪杰, 等, 2000. 纳米材料的研究现状及展望[J]. 导弹与航天运载技术, (3): 11-16.
 Corrin M L, Nelson J A, Cooley B, et al, 1967. The preparation of 'pure' silver iodide for nucleation studies[J]. J Atmos Sci, 24(5): 594-595.
 Fletcher N H, 1958. Size effect in heterogeneous nucleation[J]. J Chem Phys, 29(3): 572-576.
 Gerber H E, 1972. Size and nucleating ability of AgI particles[J]. J Atmos Sci, 29(2): 391.
 Langer G, Cooper G, Nagamoto C T, et al, 1978. Ice Nucleation mechanisms of submicron monodispersed silver iodide, 1, 5-dihydroxynaphthalene and Phloroglucinol aerosol particles[J]. J Appl Meteor, 17(7): 1039-1048.
 Poc M M, Roulleau M, 1975. The ice nucleating properties of an ultrafine aerosol of pure silver iodide[J]. J Appl Meteor, 14(6): 1146-1150.
 Steele R L, Krebs F W, 1967. Characteristics of silver iodide ice nuclei originating from anhydrous ammonia-silver iodide complexes: part I[J]. J Appl Meteor, 6(1): 105-113.