

# 高效碘化银焰火剂及其成冰性能的研究\*

鄯大雄 陈汝珍 蒋耿旺

(中国气象科学研究院, 北京, 100081)

罗秉和 崔云山

(北京理工大学化学与材料学院, 北京, 100081)

## 摘 要

介绍了新研制的两种高效碘化银焰剂 BR-88-5 和 BR-91-Y。据云室检测, 它们的成核率在  $-7.5$ — $20^{\circ}\text{C}$  时均可达到  $10^{15}/\text{g AgI}$ , 其中 BR-91-Y 焰剂具有更高的核化速率。两种按国外配方制作的焰剂也在同样条件下进行了测试对比。对焰剂燃烧产生的气溶胶作了物理化学性质检测, X 光衍射分析表明, BR-91-Y 焰剂产生的气溶胶中 AgI 仍然保持六方晶系, 其点阵参数比 AgI 本身及其他 AgI 复合核更接近于冰。结合其他检测, 讨论了新焰剂具有优良性能的原因。

**关键词:** 人工冰核, 碘化银焰剂, 冰核化性能。

## 1 引 言

$\beta\text{-AgI}$  为六方晶系, 晶体的点阵参数非常接近于冰, 其微粒在温度低于  $-4^{\circ}\text{C}$  下能充当冰核, 通过异质核化在过冷云中产生冰晶。在人工影响天气的应用中, 燃烧 AgI 丙酮溶液或 AgI 焰剂是产生人工冰核气溶胶的常用方法。AgI 焰剂具有能适应多种运载工具和作用方便的优点, 国内这项技术的应用才刚刚开始。从 1988 年起中国气象科学研究院与北京理工大学合作致力于高效 AgI 焰剂的研究工作。

碘化银焰剂一般由 AgI、氧化剂、燃烧剂、添加剂和粘合剂组成, 国外已有多种 AgI 焰剂配方, 其成分与比例各不相同。很多检测表明, 焰剂配方不同, 会使所产生的气溶胶的物理性质存在差异, 从而导致其成冰性能的差别。

AgI 等人工冰核通过异质核化产生冰相, 前人的研究表明, 人工冰核的核化能力, 取决于它能改变所吸附水分子的取向并形成似冰结构的程度。冰核晶体的点阵参数愈接近于冰, 原子排列与冰的错位愈小, 则与冰的界面应力也愈小, 冰晶在其上取向附生增长时的能障愈低<sup>[1]</sup>。AgI 与冰一样为六方晶系, 其点阵参数已很接近于冰, 如能再降低这种差别, 则可能进一步提高其成冰效率。在这方面国外进行过一些实验工作, 旨在产生 AgI 与其他物质的复合气溶胶, 因为 AgI 中银原子部分被铜或某些其他金属原子取代, 碘原子

\* 1993 年 3 月 5 日收到原稿, 1993 年 5 月 22 日收到修改稿。工作得到非教育系统出国人员科技活动项目资助。

部分被其他卤族原子取代,都可能改变 AgI 晶体的点阵参数。

Vonnegut 与 Chessin<sup>[2]</sup>, Passarell 等<sup>[3,4]</sup> 及 Palanisamy 等<sup>[5]</sup> 分别在实验室中制备了 AgI-AgBr, AgI-CuI 和 AgI-AgCl 等复合冰核气溶胶。X 射线衍射分析表明,这些复合核的晶体结构发生了变化,由原来 AgI 的六方晶系,变成了面心立方晶系。但晶体的(111)面与冰的(0001)面类似,其边长随掺入物质的量改变,在某一定的摩尔比下,晶包边长可与冰的 a 轴完全配合。检测表明,它们的成冰阈温与成核率都有明显提高。另外,掺入物质还可能在 AgI 上形成亲水中心或结构缺陷,增加表面活性点,是其成冰性能得到改善的另一原因。最近,Scott 等<sup>[6]</sup> 又在 AgI-NH<sub>4</sub>I 丙酮溶液中加入少量 BiI<sub>3</sub>, 燃烧产生了六方晶系的气溶胶,其点阵参数也比 AgI 更接近于冰,使成核率提高了一个量级。

除晶体结构外,AgI 气溶胶对水汽的敏感程度还影响其核化机制。纯 AgI 及 AgI-AgCl 复合核通过接触核化机制产生冰晶,核化速率较低<sup>[7]</sup>; 而通过 AgI-丙酮溶液系统产生的气溶胶如 AgI-NaI<sup>[8]</sup>、AgI-AgCl-NaCl 复合核<sup>[9]</sup> 及(前)苏联的省银剂产生的气溶胶<sup>[10]</sup>, 由于附有吸湿成分 NaCl 或 KCl, 气溶胶粒子通过凝结-冻结机制核化冰晶,核化速率较高,能在云条件下迅速产生冰晶。

上述 AgI 复合冰核的研究工作很有意义,一些通过燃烧 AgI 丙酮溶液产生复合冰核的方法,已开始人工影响天气外场作业中应用,但很少见用于 AgI 焰剂的研制中。仅有的一个报告来自南斯拉夫,Huter 等<sup>[11]</sup> 在 AgI 焰剂中加入 CuI,使高温段的成核率得到提高。事实上,AgI 焰剂配方中含有多种成分,有更多的化学物质参与燃烧过程,比 AgI 丙酮溶液更容易生成 AgI 的复合核,问题在于研制出一种好的配方。

为了研制出新型高效焰剂,我们设计新配方的思路是:吸取国外配方的某些优点,如减少 AgI 的份量,加入富碘化合物等,并充分考虑有关复合冰核的研究成果,以期通过燃烧焰剂产生成核率和核化速率都高的复合冰核。

## 2 检测程序及误差分析

焰剂配方的优劣取决于它的成冰性能,主要通过云室的检测来了解。关于冰核检测,国内外没有统一的标准仪器设备和方法。云室的工作方式、体积、云雾参数的控制以及检测程序的不同,都会导致检测结果相当大的差别,致使不同云室的检测结果难以比较。但是,一般认为几个立方米的云室,体积较大而条件易于控制,所以检测结果比较可靠。本研究对焰剂成冰性能的检测,都是在中国气象科学研究院的 2m<sup>3</sup> 等温云室<sup>[12]</sup> 中进行的。

检测程序如下:云室制冷至所需温度,送雾清除本底冰核,调节送雾气流使含水量维持在 1.5—2.0g/m<sup>3</sup> 之间;将待检测的焰剂小药柱(2.5 或 3g)在稀释风洞底部点燃,使所产生的气溶胶在风洞中与环境空气混合稀释,再用取样器从风洞中抽取,全部或部分注入云室中;气溶胶在云室中活化产生的冰晶,增长下落,由一叠预冷的载玻片承接,每隔一定时间(1—5min)依次取出,在带冷台的显微镜下观测计数,持续到冰晶不再落出为止。

从焰剂药柱中 AgI 含量、药柱燃烧时间、风洞中流量和注入云室的样气体积,可计算进入云室的 AgI 的质量。假定每个冰核在云室中只活化一次,并忽略送雾气流对云室内冰核气溶胶的稀释,则可从冰晶的累积计数计算成核率;从冰晶计数随时间的变化估算核化速率。成核率由下式给出:

$$E = N_{ice} \cdot A_c \cdot F \cdot R \cdot t / A_v \cdot m \cdot V$$

式中  $E$  为成核率即每克 AgI 产生的有效冰核数,  $N_{ice}$  为一个视野平均冰晶累计数,  $A_c$  为云室底面积,  $F$  为风洞内空气流量,  $A_v$  为显微镜视野面积,  $m$  为焰弹含 AgI 量,  $R$  为气溶胶稀释倍数,  $V$  为取样器体积,  $t$  为焰弹燃烧时间。

检测误差分析: 云室体积已定, 器壁等的影响属系统性误差, 不妨碍同云室检测结果的比较。误差主要来自检测条件的控制与参数的测量。云室温度在一次检测过程中可偏离其平均温度  $\pm 0.15^\circ\text{C}$ , 最大可引起成核率  $\pm 1.5$  倍的误差。向云室送雾和注入气溶胶, 会使云室产生局地过饱和, 虽然其体积仅为云室体积的  $0.2\% - 0.7\%$ , 但将使更多冰核活化, 并使核化速率加快, 估计由此造成成核率的偏高值最大不会超过 3 倍。含水量在云室出现大量冰晶时将下降, 使检测过程延长, 核化速率变慢, 但对成核率检测结果影响不大。稀释风洞风速稍受环境风速影响可使计算注入云室的 AgI 含量的误差达  $\pm 5\%$  左右。冰晶目测计数在冰晶大量出现时低估约  $8\%$ 。未作送雾气流稀释订正会使成核率检测值最大偏低  $10\%$ 。至于外来及残存冰核, 检测前已被清除, 不致引起误差。

综上所述, 成核率检测的误差最大不会超过  $\pm 2.5$  倍, 这与成核率检测数据离散约半个量级是相符合的, 这方面  $2\text{m}^3$  云室优于国外同类云室。大量检测结果表明该云室性能稳定, 重复性好, 可以清楚分辨出几种焰剂成核率的差别, 能满足本实验的要求。

### 3 配方筛选试验及成冰性能检测

焰剂配方的筛选是与云室检测密切结合进行的, 所进行的试验及结果分述如下:

#### 3.1 美苏焰剂的仿制及检测

为了取得研制焰剂的经验和可比较的资料, 按照已公布的美 TB-1 焰弹和苏省银剂的配方<sup>[13,10]</sup>压制了两批小药柱, 在云室中进行成冰性能检测。其成核率由图 1 和图 2 给出, 图中还给出了瑞士 ETH 的 100L 云室<sup>[10]</sup>及美苏各自对这两种焰剂检测的结果。应指出的是, 瑞士及美苏检测用的是这两种焰剂的原品, 而我们的检测用的是按公布的配方制作的焰剂, 成分一样, 但制作工艺上可能有差别。从图中可以看出,  $2\text{m}^3$  云室检测结果离散最小, 而检测出的成核率最高, 比美国 CSU 云室对 TB-1 焰弹的检测值高数倍, 比(前)苏联对省银剂的检测值高约一个量级; 而瑞士 ETH 云室的检测值最低。 $2\text{m}^3$  云室体积较大, 冰核能在其中较充分活化, 成核率高是合理的。如上所述, 不同云室的检测结果难于直接进行比较, 但是在同一云室、同样条件下的检测结果, 则比较有意义。从图 1, 2 中可以看出, 无论是  $2\text{m}^3$  云室还是 ETH 的 100L 云室的检测结果都表明, (前)苏联省银剂的成核率高于美国的 TB-1 焰弹。这一结果对我们拟定配方有重要参考价值。

#### 3.2 配方筛选试验

焰剂配方中所含多种成分是相互制约的, 且综合影响所产生的气溶胶的成冰性能, 但不可能对每一成分都进行筛选。在拟定基本配方后, 进行了两组成核率检测试验: 一组是改变 AgI 在配方中的比例, 分别为  $0.5\%$ 、 $1\%$ 、 $1.2\%$ 、 $1.5\%$ 、 $2\%$  和  $3\%$  等, 发现以含  $1\%$  AgI 的成核率最高; 另一组试验在基本配方中分别加入不同成分的金属盐, 约 10 种, 多数为有机或无机铜盐。图 3 表示加入不同金属盐筛选检测的部分结果。经大量试验后, 先得到含有机铜盐的 BR-88-5 高效配方。

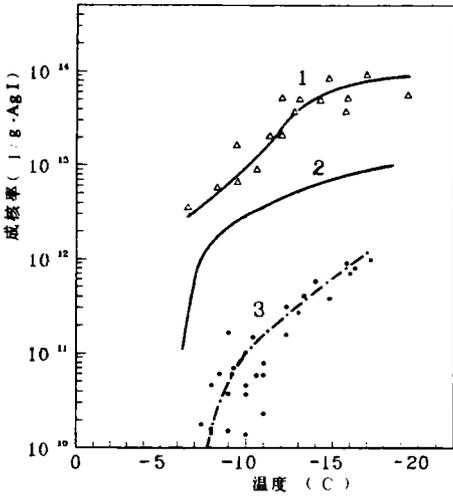


图1 3个云室对美国TB-1焰弹成核率的检测结果

(1. 中国2m<sup>3</sup>云室, 2. 美国CSU的960L云室, 3. 瑞士ETH的100L云室)

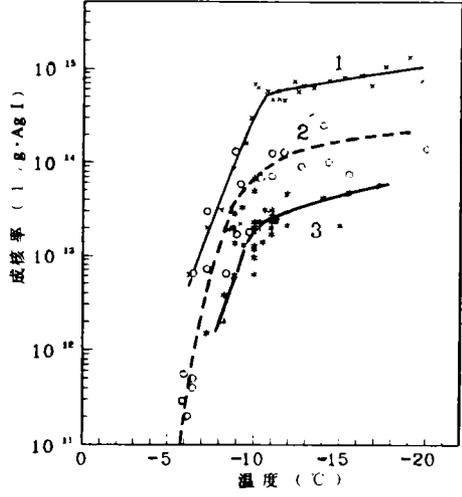


图2 3个云室对(前)苏联省银剂成核率的检测结果

(1. 中国2m<sup>3</sup>云室, 2. (前)苏联自己检测结果, 3. 瑞士ETH的100L云室)

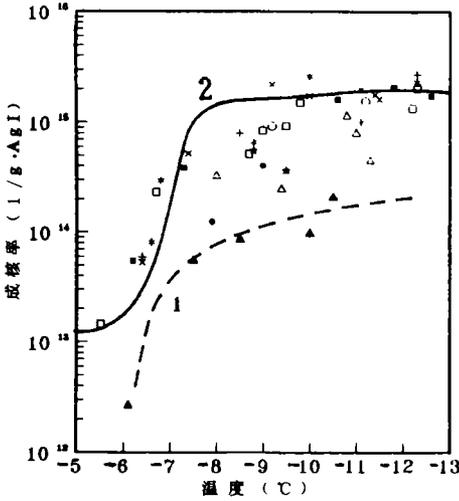


图3 成核率筛选试验的部分结果

(图中各点表示基本配方中加入各种金属盐的成核率。1. 配方中只含AgI而不含金属盐的成核率, 2. BR-91-Y焰剂的成核率)

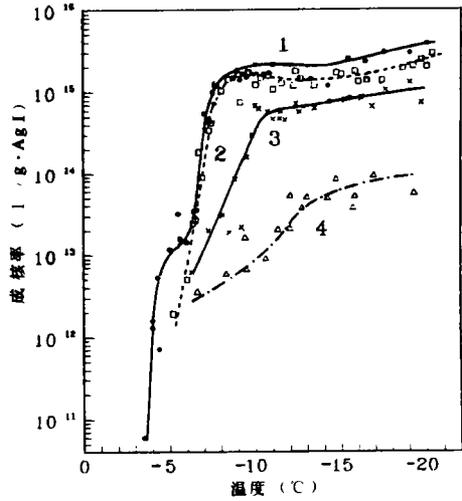


图4 2m<sup>3</sup>等温云室对4种焰剂成核率的检测结果

(1. BR-91-Y, 2. BR-88-5, 3. (前)苏联省银剂, 4. 美国TB-1焰弹)

在此基础上,再次改变加入的有机铜盐的成分,并从应用考虑,对强度、吸湿性和感度等性能及制造工艺条件作了改进,最后得到各种性能更为优良的配方BR-91-Y焰剂。

### 3.3 成核率检测及与其他焰剂和丙酮溶液比较

在较宽温度范围内,对 BR-88-5 和 BR-91-Y 焰剂的成核率检测结果显示在图 4 中,同时给出同一云室对美 TB-1 及苏省银剂的检测结果。图 4 表明,新研制的两种焰剂在低于  $-7.5^{\circ}\text{C}$  温度下成核率均高于  $10^{15}/\text{g AgI}$ ,其中 BR-91-Y 焰剂的成核率又略高,在  $-5^{\circ}\text{C}$  仍可达  $10^{13}/\text{g AgI}$ 。比美、苏的焰剂成核率分别约高 50—200 倍和 4—40 倍,差别最大出现在高于  $-10^{\circ}\text{C}$  的温度段,表明这两种新焰剂在较高温度段成冰性能更好。

一般认为焰剂的成核率比丙酮溶液燃烧法低约两个量级,但是这两种焰剂则与之相当。图 5 给出同一云室对两种配方的 AgI-丙酮溶液的成核率检测结果与 BT-91-Y 焰剂进行的比较。由图可见,焰剂的成核率在低温段较低,而在高于  $-12^{\circ}\text{C}$  温度段优于丙酮溶液,这样的反超结果国内外均未见报导。

### 3.4 核化速率及比较

按 DeMott 等<sup>[7]</sup>所提出的方法,对云室检测中冰晶随时间出现的平均资料作动力图(图 6),图中实线表示冰核随时间的衰减,或冰晶产生随时间的变化,斜率为核化速率。图 6 表明,BR-88-5 和美苏的焰剂核化速率差不多,90%的核完成核化的时间约 20min;BR-91-Y 焰剂的核化速率明显高于前三种,相应的时间为 5min,约快 3 倍。如果将 BR-91-Y 的检测资料分段平均后点图,则高于  $-12^{\circ}\text{C}$  核化速率更快。速率随温度的这种变化,提示其核化机制为凝结-冻结,这种快核能在云中短时间内迅速产生大量冰晶。

### 4 BR-91-Y 型焰剂产生的气溶胶物理化学性质测量

焰剂在燃烧时产生大量气体和气溶胶,气体很快逸散,能充当冰核的,主要是含 AgI 的那一部分气溶胶。研究它们的理化性质,将有助于了解焰剂产生人工冰核的机理,解释 BR-91-Y 焰剂具有高成核率和核化速率的原因。

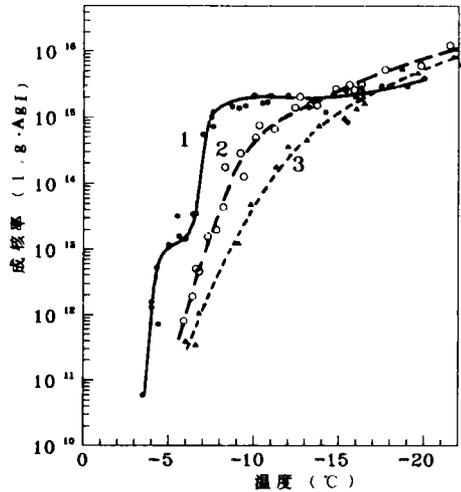


图 5 高效焰剂与两种 AgI 丙酮溶液成核率检测结果的比较  
(1. BR-91-Y 焰剂, 2. AgI · AgCl-NaCl 复合核, 3. AgI(以  $\text{NH}_4\text{I}$  为增溶剂的丙酮溶液))

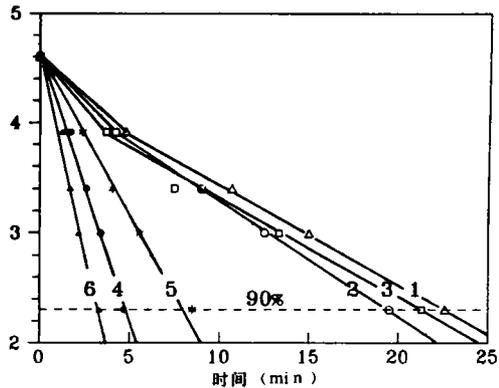


图 6 4 种焰剂核化冰晶的动力图  
(1、2、3、4 分别对应美 TB-1、苏省银剂、BR-88-5、BR-91-Y, 5 为低于  $-12^{\circ}\text{C}$  时的 BR-91-Y, 6 为高于  $-12^{\circ}\text{C}$  时的 BR-91-Y。纵坐标为未活化核百分比的自然对数)

#### 4.1 气溶胶元素成分分析

在一体积为  $10\text{m}^3$  的小室中, 点燃  $2.5\text{g}$  焰剂, 待烟气弥散均匀后, 用中国科学院高能物理研究所提供的低本底滤纸取样, 流量  $5\text{L}/\text{min}$ , 取  $1\text{min}$ , 共取得含气溶胶的空气样  $5\text{L}$ 。然后由高能物理研究所进行中子活化分析, 得到的主要元素成分列于表 1。

表 1 中还以银为 1, 分别给出所含各元素的质量比和克原子量比。从表中可以看出, 银和铜含量相当, 碘含量比银高出 5 倍, 而钾和氯的含量最高。钠和少量的溴是由其他药料杂质带人的。由此可见, 焰剂产生的是一种多相气溶胶系统, 其主要成分为  $\text{KCl}$ , 除含  $\text{AgI}$ 、 $\text{CuI}$  外, 可能还有  $\text{AgCl}$ , 另外还有  $\text{KI}$ 、 $\text{NaCl}$ 、 $\text{NaI}$  等吸湿性成分。由于分析方法的限制, 氧、硫、氢、碳、氮等元素不能测量, 因此它们的化合物也无法估计。

表 1 BR-91-Y 焰剂产生的气溶胶所含主要元素及其比值

元素成分	Ag	I	Cu	K	Na	Cl	Br
含量( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	495	3250	300	6650	1400	7000	88.7
质量比	1	6.57	0.61	13.43	2.83	14.14	0.18
克原子量比	1	5.58	1.03	37.20	13.28	43.02	0.25

#### 4.2 AgI 粒子晶体结构的 X 射线衍射分析

为了测定 BR-91-Y 焰剂产生气溶胶中  $\text{AgI}$  晶体的点阵参数和晶粒度, 用孔径  $0.2\mu\text{m}$  滤膜对燃烧后的气溶胶进行过滤取样  $40\text{min}$ , 得到数十毫克样品后, 请冶金部钢铁研究总院分析中心进行 X 射线粉末衍射分析。测量是在 Philips 公司的 APD-10 型 X 射线衍射仪上进行的, 选用细焦斑的钴阴极 ( $\text{Co K}\alpha$  射线), 测角仪扫描速度为  $0.125^\circ/\text{min}(2\theta)$ 。为测量小样品气溶胶粉末, 在按 (531) 晶面切割的单晶硅片上制样<sup>[14]</sup>, 并在样品中加入高纯硅粉作为内标物质, 以校准由制样高低不同所造成的误差。选用三弦中点连线法, 以提高测角精度。图 7 为 X 射线衍射扫描图。测量计算结果列于表 2, 同时给出对分析纯  $\text{AgI}$  试剂的测量结果、冰、 $\text{AgI}$  以及  $\text{AgI}+\text{BiI}_3$  复合核<sup>[6]</sup>的点阵参数等, 以资比较。

表 2 BR-91-Y 产生的气溶胶与冰和  $\text{AgI}$  的点阵参数的比较

样 品	点阵参数		轴比	与冰相差百分比		
	a 轴 $\text{\AA}$	c 轴 $\text{\AA}$	c/a	a	c	c/a
AgI 标准卡片	4.5922	7.510	1.635	1.57	1.94	0.34
AgI 试剂	4.593	7.514	1.636	1.59	2.00	0.40
BR-91-Y	4.571	7.469	1.634	1.11	1.38	0.28
$\text{AgI}+\text{BiI}_3$	4.583	7.493	1.635	1.37	1.71	0.34
冰	4.521	7.367	1.630	0	0	0

X 射线衍射分析表明 BR-91-Y 所产生的  $\text{AgI}$  晶体属六方晶系, 其点阵参数非常接近于冰, a 轴与冰仅差  $1.11\%$ , c 轴差  $1.38\%$ , 轴比相差  $0.28\%$ 。其不配合度小于  $\text{AgI}$  及  $\text{AgI}+\text{BiI}_3$  复合核。对  $\text{AgI}$  试剂的测量结果十分接近标准卡片的数据, 证明方法是正确的。分析还表明气溶胶中  $\text{AgI}$  的晶粒度比  $\text{AgI}$  试剂的晶粒度减小了一半。

从图 7 中可看到, BR-91-Y 焰剂产生气溶胶中除  $\text{AgI}$  外,  $\text{KCl}$  有更强的衍射峰, 这与元素分析的结果一致, 表明焰剂产生的是以  $\text{KCl}$  为主的多相气溶胶系统, 它们具有吸湿

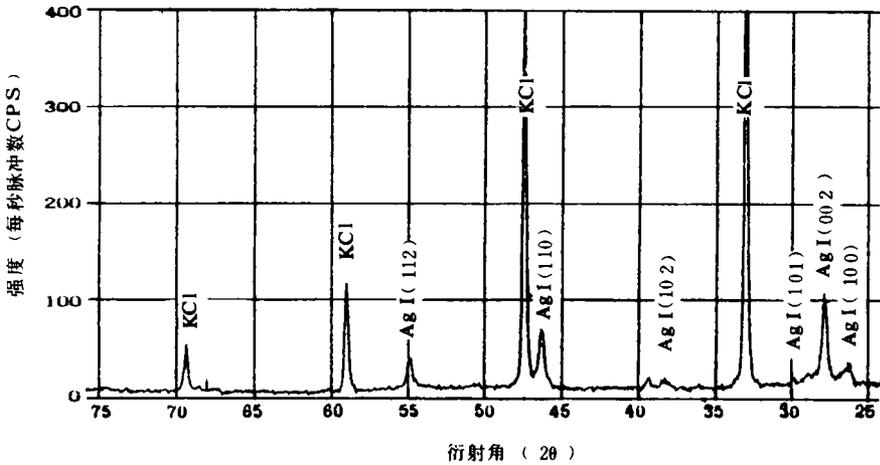


图7 BR-91-Y 焰剂燃烧产生的气溶胶粒子的 X 射线衍射图

性。

#### 4.3 气溶胶的粒度

用自制的静电沉降器对燃烧焰剂产生的气溶胶取样,电场强度为  $4000\text{V}/\text{cm}$ 、流率为  $5\text{L}/\text{s}$ ,粒子沉降在由金属细网托附的喷碳胶膜上,然后在北京大学物理系的透射电镜下照相,放大 2 万倍。有部分粒子凝聚,但能分辨单个粒子的大小,它们分布在  $0.025$  至  $0.4\mu\text{m}$  之间,均立方直径为  $0.178\mu\text{m}$ 。按燃烧产物的理论分析估算,焰剂燃烧产生的气体约占 70%,固体约占 30%。除去灰分,1 g 焰剂燃烧约产生 0.25g 固态气溶胶粒子,其直径取  $0.178\mu\text{m}$ ,密度取  $2\text{g}/\text{cm}^3$ (因其主要成分为 KCl),按此估算含 1 g AgI 的焰剂可产生  $4.23 \times 10^{15}$  个气溶胶粒子。这比该焰剂在低温下的成核率高约一倍,即此时气溶胶的活化比高达 1:2,当温度高于  $-7.5^\circ\text{C}$ ,活化比迅速下降。

## 5 结论及讨论

经过大量的配方筛选试验和云室检测,得到了 BR-88-5 和 BR-91-Y\* 两种高效 AgI 焰剂,它们的性能可概括为下列几点:

(1)具有十分高的成核率:在温度低于  $-7.5^\circ\text{C}$ ,两种焰剂的成核率均可达到  $10^{15}/\text{g}$  AgI 以上,不仅优于国内外已有的焰剂,且在高于  $-12^\circ\text{C}$  时,还高于 AgI-丙酮溶液的成核率。提高在较高温度段的成核率,意味着能放宽人工催化的限度(对更高温度和更低高度的云进行作业),因而能增加人工影响天气作业的机会,新焰剂朝此迈出了重要的一步。

(2)具有很高的核化速率:BR-91-Y 焰剂的核化速率高于已有的其他焰剂,在水面饱和条件下,平均 5min 内即有 90% 的核完成核化。这种快核能在短时间内在云中产生大量冰晶,特别适合于催化生命期短的积云,以及在防雹作业中使用。BR-88-5 焰剂的核化速

\* BR-91-Y 焰剂于 1993 年 1 月通过专家鉴定,并已用于与黑龙江省共同研制的龙 B-1 型发射式航空焰弹,及航天工业总公司西安 41 所研制的防雹降雨火箭。

率较低,较适合用于大面积层状云的催化作业。

(3)核化机制:BR-91-Y 焰剂产生吸湿性的 AgI 气溶胶,核化速率随温度加快,其核化机制为凝结-冻结。

(4)良好的工艺性能:BR-91-Y 焰剂具有强度高、感度低、吸湿性低、工艺先进和制作安全等优点,有关内容将在另文中介绍。

BR-91-Y 焰剂具有非常高成核率的原因,可能主要有以下几点:

(1)AgI 在焰剂中比例很小,仅占 1%,燃烧时能分散得更为充分,细微的 AgI 粒子附着在其他粒子上,再充当冰核,使得按单位质量 AgI 计算的成核率增高。

(2)BR-91-Y 焰剂由于配方独特,所产生的气溶胶中 AgI 仍然保持六方晶系,但点阵参数减小,更接近于冰。使冰在其上取向附生增长时能障降低,从而其成冰性能更优于前述如 AgI·AgCl,AgI·AgBr 等复合核。这种晶体结构的变化的特点,正是 BR-91-Y 焰剂具有最优的成冰性能的本质所在。

(3)与国外对焰剂产生的气溶胶尺度测量结果比较,这里测到的 BR-91-Y 焰剂粒子偏大,特别是小粒子少。气溶胶粒子偏大,有利于在较高温度下的核化,除去晶体结构方面的原因外,这也许正是 BR-91-Y 焰剂在较高温度段成核率较其他焰剂高,而在低于 $-8^{\circ}\text{C}$ 成核率无明显增加,出现成核率-温度谱线呈平台的原因。

致谢:气溶胶物理化学性质的检测,得到了中国科学院高能物理研究所杨绍晋研究员、冶金部钢铁研究总院陆金生高级工程师、北京大学秦瑜副教授的指导和帮助,他们所在单位提供了有关仪器设备,在此一并表示衷心感谢。

## 参考文献

- [1] Turnbull D and Vonnegut B. Nucleation catalysis. *Ind Eng Chem*, 1952, 44(6): 1292—1298.
- [2] Vonnegut B and Chessin H. Ice nucleation by coprecipitated silver iodide and silver bromide. *Science*, 1971, 174: 945—946.
- [3] Passarelli R E, Chessin Jr H and Vonnegut B. Ice nucleation by solid solution of silver-copper iodide. *Science*, 1973, 181: 549—551.
- [4] Passarelli R E, Chessin Jr H and Vonnegut B. Ice nucleation in a supercooled cloud by CuI-3AgI and AgI aerosols. *J Appl Meteor*, 1974, 13: 946—948.
- [5] Palanisamy M, Thangaraj K, Gobinathan R and Ramasamy P. X-ray diffraction and ice nucleation studies of AgI-AgCl solid solutions. *J Crystal Growth*, 1986, 79: 1005—1009.
- [6] Scott P T, Finnegan W G and Sinclair P G. Characterization of a modified hexagonal silver iodide ice nucleus aerosol. *J Appl Meteor*, 1989, 28: 722—726.
- [7] DeMott P L, Finnegan W G and Grant L O. An application of chemical kinetic theory and methodology to characterize the ice nucleating properties of aerosols used for weather modification. *J Climate Appl Meteor*, 1983, 22(7): 1190—1203.
- [8] Blumenstein R R, Finnegan W G and Grant L O. Ice nucleation by silver iodide-sodium iodide; A re-evaluation. *J Weather Mod*, 1983, 15: 11—15.
- [9] 鄞大雄, Finnegan W G. 一种快速高效的冷云催化剂——AgI·AgCl-NaCl 复合冰核. 气象科学技术集刊, 8, 国家气象局气象科学研究所编, 北京, 气象出版社, 1985, 37—42.
- [10] Federer B and Schneider A. Properties of pyrotechnic nucleats used in Grossversuch IV. *J Appl Meteor*, 1981, 20(9): 997—1005.

- [11] Huter M, Prelesnik B, Curic M, Mitic D and Herak R. X-ray diffraction analysis of aerosols obtained by burning of the AgI based pyrotechnics. Proceeding of the Twelfth International Conference on Atmospheric Aerosols and Nucleation, Vienna, Austria, Aug. 22-27, 1988, 670-673.
- [12] 鄞大雄, 王云卿, 陈汝珍, 蒋耿旺. 一个用于人工冰核研究的  $2\text{m}^3$  等温云室. 气象学报, 1990, 48(1): 72-79.
- [13] Sax R I, Garvey D M and Parugo F P. Characteristics of AgI pyrotechnic nucleant used in NOAA's Florida Area Cumulus Experiment. J Appl Meteor, 1979, 18(1): 195-202.
- [14] 许顺生, 陆金生等. X 射线衍射学进展. 北京, 科学出版社, 1986, 283.

## THE HIGH EFFICIENT AgI PYROTECHNICS AND THEIR ICE NUCLEATING PROPERTIES

Feng Daxiong Chen Ruzhen Jiang Gengwang

*(The Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing, 100081)*

Luo Binghe Cui Yunshan

*(Institute of chemistry and material, Beijing University of Science and Technology, Beijing 100081)*

### Abstract

The idea and procedure for developing high efficient AgI pyrotechnics used in weather modification are given in this paper. Two formulations (BR-88-5 and BR-91-Y) of pyrotechnic with high nucleating effectiveness have been obtained after a number of screen tests carried out in  $2\text{m}^3$  cloud chamber. The effectiveness can reach up to  $10^{15}/\text{g}$  AgI in the temperature range of  $-7.5$ — $-20^\circ\text{C}$  and the nucleating rate is very high for BR-91-Y. The foreign pyrotechnics were made according to the given formulations of Silverspare (USSR) and TB-1 (USA). their ice nucleating properties have also been tested in the same chamber for comparison with the new pyrotechnics. The aerosols produced by the new pyrotechnics as the hexagonal crystal form of AgI have been identified by the X-ray powder diffraction analysis and proved to have the closest match to ice.

**Key words:** Artificial ice nuclei. AgI pyrotechnic. Ice nucleating properties.