

降雨弹成核率鉴定的误差分析

张 铮

(北 京 大 学)

提 要

“三七”高炮降雨弹广泛应用于我国人工影响天气的作业。1978年降雨弹检测小组*在重庆对降雨弹的成核率进行了鉴定,发现1克AgI降雨弹的成核率不低于现用降雨弹。本文对重庆实验进行了误差分析,认为此实验具有一定的可信度。如果将现用“三七”高炮降雨弹的配方改成1克AgI,每年将为国家节约几十万元。

一、前 言

携带碘化银的“三七”高炮降雨弹,由于能在很短的时间向云中所要求的部位发射大量的人工冰核,而且操作方便,机动灵活,所以在我国人工降雨和消雹作业中广泛采用。随着人工影响天气工作的开展,对碘化银降雨弹数量的要求逐年增多,但由于银的价格昂贵,不能回收,以及对环境的污染等原因,故急需节约白银降低降雨弹中碘化银的用量,并应筛选新的催化药品逐步取代碘化银,这是我国当前人工影响天气工作中面临的重要课题之一。

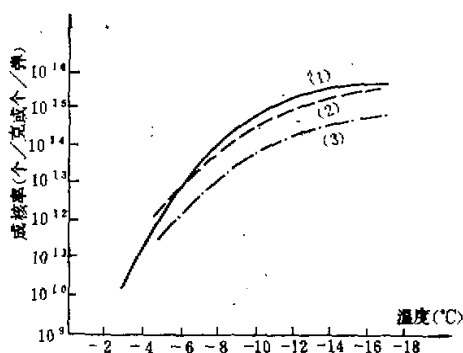


图1 两种碘化银弹的成核率

曲线1: 1克碘化银弹的成核率(个/克)

曲线2: 现用降雨弹的每弹成核率(个/弹)

曲线3: 现用降雨弹的成核率(个/克)

1980年2月8日收到修改稿。

* 降雨弹检测小组由四川省气象局主持,于1978年11—12月间在重庆对“三七”高炮降雨弹的配方进行了成核率的鉴定实验,北京大学为参加实验的单位之一。

为改进降雨弹的配方, 降雨弹检测小组于 1978 年 11—12 月间在重庆江陵机器厂靶场, 用爆炸室和小云室, 共对降雨弹中装载不同配方的碘化银和其他催化药品的十多种类型、百余发降雨弹的成核率(即每克药品产生的冰晶数目)进行了测定, 通过实验得到的最重要结果是: “1 克碘化银弹的成核率和每弹所产生的冰晶数均高于现用降雨防雹弹(含 4—6 克碘化银和 7.2 克铝粉), 表明在现用弹装药量和装药结构情况下, 以 1 克碘化银用量为宜。”由两种碘化银弹成核率(图 1)也可看出, 现用降雨弹的成核率和每弹生成冰晶的数目均不高于 1 克碘化银弹的成核率。

然而, 由于所使用的实验装置和方法存在着不少缺点, 会引进一些误差, 因此就提出所得实验结果是否可信的问题。本文将在分析实验误差的基础上, 对 1978 年重庆实验结果的可靠程度提出自己的看法。另外, 此种分析误差的方法, 也可用于鉴定降雨火箭、焰弹等用爆炸生烟产生人工冰核的运载装置, 故具有较广泛的实际意义。

二、误差分析

实验是在四个结构完全相同的小云室中进行的, 小云室内的实验空间为直径 11 厘米、高 28 厘米的小圆柱体, 容积约为 2.5 升。小云室外壁用甘油水溶液和干冰降温, 小云室内可控制的温度范围为 -2 — -18°C , 温度测量用热电偶。冰晶取样用糖盘。降雨弹在爆炸室中爆炸, 爆炸室长 3.2 米、宽 1 米、高 2 米, 容积 6.4 立方米。四支 100 毫升注射器在爆炸室中直接抽取样气, 然后在爆炸室外的上风方向稀释样气, 稀释按每次打出 50 毫升样气, 抽进 50 毫升自然空气方法, 每稀释一次认为样气浓度降低到原浓度的 $1/2$, 根据小云室的降温情况, 注射器进行 x 次稀释后, 分别注入不同的云室中, 检测冰核数目。

1. 成核率的计算

假设爆炸室容积为 V , 注射器的体积为 v , 催化剂的成核率为 N_T , 每发炮弹中催化剂的克数为 M , 样气稀释次数为 x , 糖盘取样面积为 s , 云室横截面为 s' , 糖盘中出现的冰核总数为 n_T 。

根据上述实验方法, 则每发降雨弹中某一温度下待测催化药品的成核率 N_T , 可表示为

$$N_T = \frac{1}{M} \cdot \frac{V}{v} \cdot 2^x \cdot \frac{s'}{s} n_T = A \cdot 2^x \cdot n_T \quad (1)$$

其中

$$A = \frac{1}{M} \cdot \frac{V}{v} \cdot \frac{s'}{s} \quad (2)$$

由于 M , V , v , s' 和 s 均为常数, 则 A 也为常数。

由(1)式可看出, N_T 之大小主要取决于糖盘中出现的冰核数目 n_T 和样气稀释次数 x 。

2. 成核率 N_T 的相对误差

根据公式(1), 可导出计算 N_T 的相对误差公式即

$$\frac{\Delta N_T}{N_T} = \ln 2 \cdot \Delta x + \frac{\Delta n_T}{n_T} = 0.6931 \cdot \Delta x + \frac{\Delta n_T}{n_T} \quad (3)$$

由(3)式可看出,成核率 N_T 的相对误差主要由 Δx 和 Δn_T 决定, Δx 的物理意义可认为是,当稀释次数为 x 时,样气浓度却按稀释 $x + \Delta x$ 次数的程度变化; Δn_T 代表糖盘中的虚假冰核,它不是样气中的冰核,而是由其他原因造成的。

3. 冰核记数引进的误差

为减少由冰核记数引进的相对误差 $\Delta n_T/n_T$, 要求样气在糖盘中出现的冰核数目 n_T 愈大愈好,但糖盘取样面积有限,最多能承受 300—400 个冰核,在实际观测中,我们将 n_T 值保持在 100—300 个范围。

对于虚假冰核 Δn_T 值要求愈小愈好,可认为主要由本底冰核 $\Delta n_T'$ 和污染冰核 $\Delta n_T''$ 两部份组成。

本底冰核 $\Delta n_T'$ 是指不通入样气,在云室内作空白实验时,糖盘中出现的冰核,通过涂抹甘油和多次通雾,虽然可防止室壁结霜脱落和清除上次实验未活化的冰核,但由于小云室不密封与实验室内的空气相通,因而会引进由爆炸室逸散出来的冰核以及自然冰核,这些是清除不掉的,然而可通过空白实验检测出来, $\Delta n_T'$ 是温度的函数,随温度降低而增加。根据实测,当小云室温度高于 -10°C 时, $\Delta n_T'$ 为几个至十几个, $\Delta n_T'/n_T$ 约为 10% 左右。

污染冰核 $\Delta n_T''$, 是因爆炸室和注射器中的样气逸散到空气中后,自然空气就变得不干净受到了污染所致,用这空气进行稀释时,云室中就会出现虚假的冰核,下面对 $\Delta n_T''/n_T$ 进行估计:

设 n 代表爆炸室内未经稀释的样气浓度 (个/ cm^3), n_0 为用作稀释空气的污染冰核浓度 (个/ cm^3), 由于每稀释一次按打出 $1/2$ 样气, 抽进 $1/2$ 周围空气的方式进行, 则 n 经 x 次稀释后的浓度 n_x 可表示为

$$n_x = \left(\frac{1}{2}\right)^x n + n_0 \sum_1^x \left(\frac{1}{2}\right)^x \quad (4)$$

$$\text{因当 } x=5 \text{ 时, } \sum_1^x \left(\frac{1}{2}\right)^x = 0.968 \Rightarrow 1$$

$$\therefore (4) \text{ 式可写成: } n_x = \left(\frac{1}{2}\right)^x n + n_0 \quad (4')$$

由(4)'式求出污染冰核浓度 n_0 对稀释 x 次后的样气浓度 n_x 所造成的相对误差为

$$\frac{n_0}{n_x} = \frac{n_0}{\left(\frac{1}{2}\right)^x n + n_0} = \frac{1}{\left(\frac{n}{n_0}\right) \cdot \frac{1}{2^x} + 1} \quad (5)$$

由于 $\Delta n_T''$ 代表 50cm^3 用作稀释的空气在占云室底面 $1/6.27$ (即取样糖盘上) 部份所显示的冰核数目, 所以与污染冰核浓度 n_0 的关系为

$$n_0 = \frac{\Delta n_T''}{50} \times 6.27 \approx \frac{1}{8} \Delta n_T''$$

同理有:

$$n_x \approx \frac{1}{8} n_T$$

将 n_0, n_x 值代入(5)

则有:

$$\frac{\Delta n_T''}{n_T} = \frac{1}{\left(\frac{n}{2^x}\right) \cdot \frac{1}{n_0} + 1} \quad (6)$$

由(6)式可看出, $\Delta n_T''/n_T$ 与 $(n/2^x) \cdot 1/n_0$ 成反相关, $(n/2^x)$ 是样气经稀释后在云室中显示出的冰核浓度, 它与糖盘中出现的冰晶数目成正比, 因此我们只有用合适的稀释次数来调节样气浓度, 使其在糖盘中出现足够多的冰晶以及减少污染冰核浓度 n_0 , 也就是使 $(n/2^x) \cdot 1/n_0$ 尽量大, 才能减少 $\Delta n_T''/n_T$ 所引进的相对误差。下面我们通过实例计算来估计这项误差的大小。

若 n_0 取 4.9 个/cm³, 此值为 -20℃ 时的一次实测值, 并假定 n_0 不随温度改变, 表 1 计算出 1 克和 4 克碘化银降雨弹, 在稀释 5—25 次时, 污染冰核对成核率测量引进的相对误差情况。

表 1 污染冰核造成的相对误差

弹 别	$\Delta n_T''/n_T$ (%)	稀释次 数(x)	25	20	16	15	10	8	5
1 克 AgI 弹			21%	31%	—	42%	—	46%	—
4 克 AgI 弹			—	60%	34%	44%	34%	—	20%

几点说明:

1. 由表 1 可知, 污染冰核浓度引进的相对误差约为百分之几十。此误差的大小视污染冰核浓度、样气浓度和稀释次数三者的综合情况而定, 由于 $(n/2^x \cdot 1/n_0) \geq 0$, 所以从(6)式可知, $\Delta n_T''/n_T$ 不会超过 100%。

2. 若将具有污染冰核浓度为 4.9 个/cm³ 的 100 cm³ 的空气打入云室内, 糖盘中出现的冰核数目约 80 个, 因此所选的这个 n_0 值是较大的。另外, n_0 是温度的函数, 随温度增加而迅速降低, 我们所选的 n_0 是在 -20℃ 时测定的, 而表 1 计算中所应用的范围在 -4—-18℃, 因此我们假定的这个 n_0 值比实际是要偏高的, 而且温度愈高此值选得愈偏大。

3. 污染冰核浓度 n_0 在时间和空间上的分布是不均一的, 因此即使对同一管样气, 各次稀释时的 n_0 都是不同的。所以在实验时, 应该用小云室对稀释地点的污染冰核浓度进行监测, 找出一段时间平均情况的 n_0 (注意要测出不同温度区间的), 以便计算和订正污染冰核所引进的误差。

1978 年重庆实验期间没有对污染冰核浓度进行专门的监测, 这点是欠缺的。

在冰核检测过程中, 除应考虑本底冰核和污染冰核外, 由于小云室性能的局限性, 对模拟降雨弹在云中爆炸产生的冰核化过程, 还有一定的差距, 由此产生的系统误差主要为:

① 由于糖盘小, 糖液能显示冰核的临界时间只有几分钟, 所以注入到云室中的冰核超过此临界时间能在糖液中显示者, 就都被漏测了, 而使得成核率观测值偏低。

② 由于小云室的容积小, 只有 2.5 升, 而又用热水蒸汽造雾, 因此云室中水汽的过饱

和度和液态水的含量都大大高于云中实际情况,活化的冰核数目增多,而使得成核率的观测值偏高。

4. 样气稀释引进的误差

即使已经假定注射器在爆炸室取到的样气均匀有代表性,而且作为稀释的自然空气是干净未经污染的,但由于受注射器结构、抽气速度、样气中冰核粒子大小、稀释过程中注射器内样气混合不均等因素影响,样气每稀释一次其浓度不正好是稀释前的 $1/2$, 因此需作进口系数 k 的订正。例如: 当稀释次数为 x , 样气浓度实际降低为原浓度的 $(1/2)^{kx}$, 为了反映样气稀释后的真实浓度用 kx 去代替 x , 则由此造成的误差 Δx 为 $(1-k)x$ 。假定 k 为 0.90 , 这假定之意义为: 稀释 10 次, 但样气浓度变稀只相当稀释 9 次时的值。计算由稀释引起成核率测量的相对误差见表 2。

表 2 样气稀释引进的相对误差

稀释次数 x	5	10	15	20	25
Δx	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50
$\ln 2 \cdot \Delta x$	0.3466	0.6931	1.039	1.386	1.732
引进的相对误差	34.7%	69.3%	103.9%	138.6%	173.2%

由表 2 可看出, 由于进口系数 $k \approx 1$ 所引进的误差是不容忽视的, 而且随稀释次数增加而增加, 当稀释次数在 $10-25$ 次(重庆实验不超过 25 次), 对成核率观测所造成的相对误差约在 $70-170\%$ 。

5. 实测值的误差综合情况

根据重庆实验对 19 种类型、 97 发降雨弹成核率的测定, 选出 203 个可用记录, 若对每隔 2°C 温度区间内的成核率 N_T 值求出算术平均值 $\bar{N}$, 并计算各个温度区间的 $\bar{N}_T/N_T$, 即可看出 N_T 与 $\bar{N}_T$ 偏离数量级的百分比, 列成表 3 如下:

表 3 误差的综合分析

N_T 与 $\bar{N}_T$ 相差的数量级	0.5 以内	0.5—1.0	1.0—1.5	1.5—2.0	2.0 以上	记录总数
记录数目	182	4	14	2	1	203
占总记录之百分数	89.6%	2.0%	6.9%	1.0%	0.5%	
累积百分数	89.6%	91.6%	98.5%	99.5%	100.0%	

三、结 论

1. 通过误差分析可知, 虽然由注射器稀释样气所引进的相对误差很大, 由云室模拟云中条件的差异所造成的误差量级也难以估计, 但这些误差属于系统误差, 对各次实验条件一致。而由云室冰核检测对每枚弹所产生的误差, 虽然变化不小, 但造成的相对误差总量

约为百分之几十。根据每隔 2°C 温度区间 N_T 和 $\bar{N}_T$ 的比较, 相差半个量级的记录约占总记录的 90%, 说明实验的重复性强, 各种类型弹之间的成核率随温度的变化趋势彼此有相对比较意义, 所以 1978 年重庆实验结果可作为生产的参考资料。

2. 1978 年重庆实验最主要的结果, 是装 1 克碘化银的“三七”高炮降雨弹的成核率不低于现用降雨弹配方(每弹 4—6 克碘化银加 7.2 克铝粉), 因此将含 4—6 克碘化银的现用降雨防雹弹改为散装 1 克碘化银投入生产, 既可简化工艺, 又可每年为国家节约几吨碘化银和铝粉, 价值几十万元。

3. 通过误差分析, 对今后实验提出几点改进意见: ① 要监测污染冰核浓度; ② 进一步确定注射器进口订正系数 k 值; ③ 改善云室模拟条件, 使鉴定降雨弹成核率的实验条件更接近云中真实情况。

参 考 文 献

- [1] 成核率检定小组, “三七”高炮碘化银炮弹冰核生成率的鉴定, 《气象》1975 年 1 期。
- [2] 冯师颜编, 《误差理论与实验数据处理》, 科学出版社, 1964 年。

A ANALYSIS OF THE ERROR IN EXAMINING THE ICE NUCLEATION RATE OF RAIN-SHELLS

Zhang Zheng

(Beijing University)

Abstract

Rain-shells of “37” antiaircraft gun have been widely used for weather modification experiments in our country. A testing group made experiments for examining the ice nucleation rate of rain-shells in Chongqing in 1978. It is found that the ability of ice nucleation of a rain-shell containing 1g AgI is not lower than that of the dispensation now used. This article analyses the error of the experiments in Chongqing and considers the results of the experiments in Chongqing be reliable. If the dispensation of rain-shells of “37” antiaircraft gun can be changed to that containing 1g AgI, several hundred thousands yuan a year will be saved.