

碘化银粒子在 -4°C 层以下云中的损耗

陈万奎

严采蓁

(气科院人工影响天气研究所)

提 要

本文讨论了37高炮发射的人工降雨防雹弹在 -4°C 层以下云中爆炸分散时碘化银粒子的损耗。计算表明:碘化银粒子在云中降水区被降水冲刷损耗显著,因而提高了37高炮射高,保证它能被云中上升气流挟带到 -4°C 层以上云中核化,是当前国内高炮人工增雨、防雹引晶催化能否取得成效的关键。

一、引言

37mm高炮(以下简称37高炮)是一种机动性能较好的小型火炮。自70年代以来,国内已广泛用于人工增雨防雹作业,据1989年初步统计,国内已动用2000门以上、年耗弹20多万发,已成为我国人工影响天气的重要催化工具。

37高炮用于人工增雨、防雹主要不足之一是射高低,因而严重影响了碘化银成核率。现在使用的37高炮,最大射高低于6700m(射角 90°)。人工增雨、防雹作业中,射角不大于 85° 、延时引信时间18秒时,射高约为5300m。射角 45° 度(允许最低射角)、延时引信时间18秒时,射高仅3300m,延时引信时间低于18秒时,射高更低(详见表2)。这样的高度,在我国南方和北方盛夏多处于正温区或在 -4°C 层附近。爆炸分散的碘化银粒子若没有稳定,上升气流挟带到 -4°C 层以

上,是不能成为成冰核的。即使在碘化银粒子活化阈温(-4°C)附近,碘化银粒子活化率很低(千分之一(1a))而不能充分利用。因此有必要计算碘化银粒子在 -4°C 层以下云中的损耗,这对于验证引晶催化原理、评估引晶催化效果是非常必要的。

二、37高炮弹道特性和碘化银成核率

目前,国内使用两种型号37弹, I型弹弹丸重约750g,内装炸药59g,碘化银1g,弹丸出口速度 $866\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。II型弹由37高榴弹改制而成,去掉曳光部分,弹丸重约580g,内装炸药35g,碘化银1g,弹丸出口速度 $905\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。爆炸分散的碘化银成核率列于表1。37弹爆炸高度(h)和离发射点水平距离(L)与引信延时时间(Δt)和发射角(α)关系列于表2(弹道系数取2.4)。

从表1、2可得出:

1. I型或II型弹碘化银成核率,在 $>$

表1 37弹爆炸分散碘化银粒子成核率

温 度 ($^{\circ}\text{C}$)		-10	-12	-14	-16	-18	-20
成核率 (每克碘化银)	I型弹	2.5×10^9	5.2×10^9	8×10^{10}	1×10^{12}	3.5×10^{13}	1.9×10^{15}
	II型弹	9×10^9	9×10^{10}	2.5×10^{12}	1×10^{14}	2×10^{15}	1.5×10^{16}

表2 37弹弹道特性

α (度)							
		$h \cdot L$ (米)					
Δt (秒)	弹型						
		85	75	65	55	45	
10	I	h	4047	3898	3623	3215	2696
		L	387	1142	1856	2501	3050
	II	h	4041	3894	3612	3211	2693
		L	384	1140	1852	2495	3048
14	I	h	4808	4625	4273	3752	3093
		L	486	1431	2319	3121	3784
	II	h	4818	4635	4273	3759	3102
		L	484	1433	2324	3123	3811
18	I	h	5366	5138	4712	4089	3296
		L	575	1694	2741	3674	4438
	II	h	5392	5169	4729	4101	3320
		L	577	1706	2759	3697	4484

-12℃段,成核率比较低,仅在-16℃以下才和美国TB-1焰弹、苏联省银剂配方成核率接近。

2. I、II型弹丸弹道特性十分相近,在 $\alpha = 45-75$ 度时,爆炸高度大多低于5000m,在南方或北方盛夏,这个高度约在0℃层附近。

三、碘化银粒子的损耗

1. 起凝结核作用的损耗

37弹爆炸分散的纯净碘化银粒子或由机载发生器燃烧产生的复合粒子(如AgI-KI, AgI-NaI),若能被上升气流挟带到-4℃层以上云中,所需时间视上升气流强弱而不同,一般要几分钟到几十分钟。根据梅森报导[1b],在过饱和度 $S = 1\%$ 条件下,纯净碘化银粒子浓度的3%将起凝结核作用,而复合粒子则有50%起凝结核作用,因而计算凝结损耗是非常必要的,这项工作国内未见报导。

取最理想情况,爆炸分散或飞机播入的

碘化银粒子都进入了云中上升气流区。根据表2给出爆炸高度和飞机播撒高度,对应的温度层约为10℃—-4℃,由Bowen给出的云中上升速度 u (cm/s)和过饱和度 S 的近似关系 $S = 10^{-5}u^{2.2}$,结合实际云中可能出现的 u 值(50—1000cm/s),算得云中过饱和度和 S 取值范围为0.05—1%。再由Twomey给出的粒子临界半径 r_c 和临界过饱和度 S_c 的关系,可求出云中 $S \geq S_c$ 时碘化银粒子临界半径 r_c 和由 r_c 增长为云滴的半径 r ,再由降水粒子对云滴冲刷方程就可计算出碘化银粒子充作凝结核增长为云滴后的浓度损耗和质量损耗。

(1) 充作不可溶性核的损耗

纯净碘化银粒子作为不可溶性核取决于接触角和半径大小,临界半径 r_c 和临界过饱和度 S_c 有如下关系[3a]

$$r_c = \frac{2\sigma M_w}{\rho_L RT} \frac{1}{S_c} \quad (1)$$

当爆炸分散的碘化银粒子半径 $r \geq r_c$ 时,它将起凝结核作用而增长为云滴,不同 S_c 下的 r_c 值列于表3。

表3 不同 S_c 下的 r_c 计算值

S_c (%)		0.05	0.10	0.25	0.50	0.75	1.00
r_c (μm)	T=10℃	2.32	1.16	0.46	0.25	0.16	0.12
	T=-4℃	2.44	1.22	0.49	0.25	0.16	0.12

从表3可以得出:当云中 $S \leq S_c$ 时, $r \geq r_c$ 的碘化银粒子将可能充作凝结核长大成云滴。按电子显微镜观测结果[4]:37弹爆炸分散的碘化银粒子,众数半径为0.05 μm ,不同半径粒子浓度分布呈正态。据此推算,当云中 $S \leq 1\%$ 时, $r \geq 0.12\mu m$ 的碘化银粒子将可能充作凝结核而长大成云滴,由[1b]、[4],充作凝结核的碘化银粒子质量 $m = \frac{4}{3} \pi \rho N \sum f_i r_i^3 = 0.94g$ 。式中 ρ 为碘化银密度($\rho = 5.67g/cm^3$)、 N 是一克碘化银爆炸分散成半径0.01—0.7 μm 的粒子总数($N = 4 \times 10^{14}$)、 f_i 是半径为 r_i ($r_i \geq 0.12\mu m$)的

粒子浓度相对数,从文献[4]中读取(Σf , $=3\%$)。由上计算可得出:爆炸分散 1g AgI 约有 0.94g 充作凝结核可能被损耗,仅有 0.06g 可在 -4°C 以下云中核化为冰晶或雪花。当云中过饱和度 S 低于 1% 时,充作凝结核的 AgI 粒子尺度将更大些,相对数浓度 f 也将降低($f < 3\%$),遗憾未见到这方面的实验和理论数据,本文仅作定性估算:若 $S = 0.5\%$ 、则仅当半径 $r_c \geq 0.25\mu\text{m}$ AgI 粒子充作凝结核,又若 f 取为 1% (相当于 $r_c \geq 0.3\mu\text{m}$ 粒子充作凝结核), 1g AgI 爆炸分散约有 0.60g 被损耗, f 更小时,凝结损耗会更小些,发展旺盛的积状云 S 较大,可接近 1% ,凝结损耗不可忽视, S 较低时, f 也随之减小,凝结损耗也将减小。

(2)充作可溶性核的损耗

表面包封碘化钠、碘化钾的碘化银复合核是一种表面可溶性核, r_c 与 S_c 有如下关系(3b):

$$r_c = S_c^{-2/3} \left(\frac{32\sigma^3 M_w M_N}{27\rho_L^2 R^3 T^3 i \rho_N} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

式中 i 为Van'tHoff因子,对于盐酸盐(如 NaCl)约为2,硫酸盐(NH_4SO_4)约为3。本文计算中 i 取2(i 值变化不会引起 r_c 较大变化),计算值列于表4。

表 4 式(2)计算的 S_c - r_c 关系($T = -4^\circ\text{C}$)

$S_c(\%)$	0.05	0.10	0.25	0.50	0.75	1.00
$r_c(\mu\text{m})$	0.085	0.054	0.029	0.018	0.014	0.012

从表4可得出:在 $S \leq 1\%$ 云中, $r \geq 0.012\mu\text{m}$ 的复合粒子将可能充作凝结核而增长成云滴,和不可溶性核质量计算方法一样,算得 $m = 0.99\text{g}$ 即机载碘化银发生器,若在 -4°C 层以下播撒仅 0.01g 保持烟粒状态,而 0.99g 将充作凝结核可能被损耗。

(3)充作凝结核增长为云滴的损耗

充作凝结核的碘化银粒子增长为云滴后,并不都被损耗,一部分仍可被气流挟带

到 -4°C 层以上冻结后再增长为冰晶、雪花或霰粒,另一部分则可能被降水粒子冲刷到地面而造成完全损耗。前者取决于播撒处是否是上升气流区,若不是也将完全损耗,后者则取决于降水强度和增长成云滴的大小。由如下途径计算降水冲刷损耗:首先由凝结增长方程(2b, 1c)计算增长为云滴的半径 r ,

$$r \frac{dr}{dt} = GS F \quad (3)$$

$$G = \frac{D\rho_E}{\rho_L} \left(1 + \frac{DL^2 \rho_v M_w}{RT^2 K} \right)^{-1}$$

积分方程(3)得:

$$r = (r_0^2 + 2GSFt)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

当 S 为 $1, 0.5, 0.05\%$, T 为 $269-283\text{K}$,由公式(4)计算的云滴半径 r 和被雨滴($R \geq 500\mu\text{m}$)冲并效率(1d)列于表5(1)。

表 5(1) 不同 S , t 时云滴半径 r 和冲并效率 E

$S(\%)$	$r_0(\mu\text{m})$	$T(\text{K})$	$t=600\text{ s}$		$t=3600\text{ s}$	
			$r(\mu\text{m})$	E	$r(\mu\text{m})$	E
1	1.2×10^{-5}	269 283	2.5 3.5	0.27 0.45	6.0 8.1	0.71 0.82
0.5	2.5×10^{-5}	269 283	1.8 2.3	0.17 0.23	4.2 5.7	0.54 0.68
0.05	2.3×10^{-4}	269 283	2.3 2.4	0.23 0.24	2.7 2.9	0.32 0.36

从表5(1)得出:即使过饱和度 S 很低时(0.05%), AgI 粒子长大为云滴被雨滴冲并效率 E 仍可达到 $0.23-0.36$ 。随着 S 、 t 增加 E 更大,如 $S = 1\%$ 、 $t = 3600\text{sec}$ 时 $E = 0.82$,可见冲并已不容忽视。雨滴冲并云滴可由本文公式(13)计算。不同 S 、 t 时,冲并引起 AgI 粒子浓度损耗率 P 见表5(2)。

从表5(2)得出:在同一过饱和度 S 下,若 AgI 粒子没有被上升气流及时带到核化高度核化为冰晶、雪花, AgI 粒子中充作凝结核随增长时间增加被雨滴冲并损耗率 P 就大,如 $S = 1\%$, $I = 5\text{mm/hr}$, $t = 600\text{sec}$ 时,冲并损耗率 P 为 $0.21-0.50$, t 增为 3600sec 时 P 增大为 $0.76-0.99$ 。过饱和度 S 减小

表5 (2)

不同雨强下冲并损耗率P

S(%)	1				0.5				0.05			
	600		3600		600		3600		600		3600	
t(sec)												
E	0.27	0.82	0.27	0.82	0.17	0.68	0.17	0.68	0.23	0.36	0.23	0.36

损耗率P

I (mm/hr)	1	0.063	0.179	0.322	0.693	0.040	0.151	0.117	0.642	0.054	0.083	0.282	0.405
	5	0.209	0.501	0.756	0.986	0.138	0.447	0.588	0.971	0.181	0.269	0.699	0.847
	10	0.336	0.711	0.914	0.999	0.227	0.643	0.787	0.998	0.294	0.420	0.876	0.962
	15	0.432	0.821	0.966	1.000	0.300	0.759	0.882	1.000	0.382	0.530	0.954	0.989
	20	0.509	0.885	0.986	1.000	0.361	0.834	0.932	1.000	0.455	0.613	0.974	0.997

时, P降低但仍不可忽略。如 $S = 0.05\%$ 、 $I = 5\text{mm/hr}$ 、 $t = 600, 3600\text{sec}$ 时损耗率P各为 $0.18-0.27$ 和 $0.70-0.85$ 。因此, AgI 粒子作为凝结核长大成云滴, 凝结损耗不可低估。在有降水的积状云中作业时, 雨强更大, 引起的损耗更显著, 这不仅浪费了宝贵的银, 还有可能影响地面雨水样品中含银量分析。

2. 碘化银粒子和云滴凝聚的损耗

云中爆炸分散的碘化银粒子不可避免地和云滴发生碰撞导致凝聚, 使碘化银损耗。

将碘化银粒子近似按球形处理, 半径为 r_2 、爆炸分散后空间平均浓度为 n_2 , 云中云滴半径为 r_1 , 浓度为 n_1 。凝聚方程如下(1e, 3c, 5):

$$-\frac{dn}{dt} = 2\pi(D_1 + D_2)(r_1 + r_2)n_1n_2 \quad (5)$$

式中D为扩散系数,

$$D_1 = \frac{RT}{N} \frac{1 + A1/r_1}{6\pi\mu r_1}$$

$$D_2 = \frac{RT}{N} \frac{1 + A1/r_2}{6\pi\mu r_2} \quad (6)$$

(6) 式代入 (5) 式, 考虑到 $r_2 \ll r_1$ 、 $D_1 \ll D_2$, (5) 式变为

$$-\frac{dn_2}{dt} = \frac{RT}{3\mu N} \left(\frac{1 + A1/r_2}{r_2} \right) r_1 n_1 n_2$$

$$= K_1 n_2 \quad (7)$$

$$K_1 = \frac{RT}{3\mu N} \left(\frac{1 + A1/r_2}{r_2} \right) r_1 n_1$$

积分 (7) 式有:

$$n_2(r_2, t) = n_2(r_2, 0) \exp[-K_1 t] \quad (8)$$

表6列出了 $t = 600\text{sec}$ 、 $r_1 = 10\mu\text{m}$ 、 n_1 为 $10^2 - 10^3\text{cm}^{-3}$ 时, 方程 (8) 计算值。

表6

由方程(8)计算的凝聚损耗率

$r_2(\mu\text{m})$		0.01		0.1		1.0	
$T(\text{K})$	P						
$n_1(\text{cm}^{-3})$		283—269		283—269		283—269	
10^2		0.043	0.041	0.001	0.001	0.000	0.000
5×10^2		0.198	0.190	0.004	0.004	0.000	0.000
10^3		0.358	0.343	0.008	0.008	0.000	0.000

从表6可以得出: 和云滴凝聚损耗主要是 $r_2 \leq 0.1\mu\text{m}$ 较小粒子, 云滴数浓度越大损耗越大, 根据观测, 云中众数浓度范围在 10^2

$-5 \times 10^2\text{cm}^{-3}$, 多数在 $10^2 - 3 \times 10^2\text{cm}^{-3}$ 。在凝聚时间 $t = 600\text{sec}$ 时, $r_2 > 0.1\mu\text{m}$ 的较粗粒子, 即使云滴浓度 $n_1 = 5 \times 10^2\text{cm}^{-3}$ 时,

凝聚损耗率P不到1%，完全可以忽略不计。对于 $r_2 \leq 0.01 \mu\text{m}$ 微细粒子，即使 $n_1 = 10^2 \text{ cm}^{-3}$ ，凝聚损耗率P约为4%，当 n_1 增加为 $5 \times 10^2 \text{ cm}^{-3}$ 时，凝聚损耗率可达19%。随着凝聚时间增加（由于未进入上升气流区）凝聚损耗率也增加，如在 $t = 3600 \text{ sec}$ 时， $n_1 = 10^2 \text{ cm}^{-3}$ ， $r_2 \leq 0.01 \mu\text{m}$ 粒子损耗率为23%，而 $n_1 = 5 \times 10^2 \text{ cm}^{-3}$ 时， $r_2 \leq 0.01 \mu\text{m}$ 粒子损耗率增为73%。和云滴凝聚后，将和充作凝结核增长为云滴一样，一部分可能随上升气流到 -4°C 层以上冻结，另一部分将可能被降水冲刷到地面完全损耗，不同的是凝聚后被冲刷主要是微细粒子（ $r_2 \leq 0.01 \mu\text{m}$ ）而充作凝结核后被冲刷主要是较粗粒子（ $r_2 > 0.01 \mu\text{m}$ ）

3. 碘化银粒子间的凝聚损耗

37弹在爆炸的短时间内，碘化银粒子空间浓度很高，它们之间将产生碰撞而导致凝聚，机载碘化银发生器产生的烟流如不能很快被周围大气稀释也有凝聚问题。凝聚引起碘化银粒子浓度减小方程如下：

$$-\frac{dn_2}{dt} = 8\pi D_2 r_2 n_2^2 \quad (9)$$

$$\text{或} -\frac{dn_2}{dt} = \frac{4}{3} \frac{PT}{N\mu} \left(1 + \frac{Al}{r_2}\right) n_2^2 = K_2 n_2^2 \quad (10)$$

$$K_2 = \frac{4}{3} \frac{RT}{N\mu r_2} (r_2 + Al)$$

积分(10)得到：

$$\frac{1}{n_2(r, t)} = \frac{1}{n_2(r, 0)} + K_2 t \quad (11)$$

如果爆炸后600sec内，AgI粒子分散空间为 $10^2 - 10^6 \text{ m}^3$ ，每克AgI可分散为半径 $0.01 - 0.7 \mu\text{m}$ 粒子，其数目为 4×10^4 个，那么平均AgI粒子空间浓度为 $10^6 - 10^2 \text{ cm}^{-3}$ 。由方程(11)算得的AgI粒子损耗率P列于表7。

从表7可得出：爆炸分散的AgI粒子，如果在短时间内（表中是600sec计算值）能很快扩散稀释，碘化银粒子之间凝聚引起浓度损耗率P将可以忽略。如表所列数据 n_2

表7 AgI粒子间凝聚引起的浓度损耗率

$r_2 (\mu\text{m})$ P $n_2 (\text{cm}^{-3})$		
	0.01	0.1
10^2	0.000	0.000
10^3	0.002	0.000
10^4	0.017	0.003
10^5	0.150	0.033
10^6	0.640	0.252

$= 10^2 \text{ cm}^{-3}$ 时，即使 $r_2 = 0.01 \mu\text{m}$ 粒子浓度损耗率为0.0%，较粗的粒子（ $r_2 = 0.1 \mu\text{m}$ ）浓度损耗率亦为0.0%。仅当不能很快扩散稀释时（如碘化银发生器产生的烟流在静风区或在飞机机尾涡流区），凝聚引起浓度损耗才不容忽视，例如当 $n_2 \geq 10^6 \text{ cm}^{-3}$ ，即使在600sec时间里，浓度损耗已高达25—64%（见表7）。

4. 降水对碘化银粒子的冲刷损耗

在已有降水的云中作业，碘化银粒子被降水冲刷可按如下方程计算(1f)

$$-\frac{dn_2}{dt} = \sum \pi R^2 E(R, r_2) N(R) V(R) \times n_2(r_2) \quad (12)$$

梅森将上式近似表示成雨强关系：

$$-\frac{dn_2}{dt} = 4 \times 10^{-4} E(R, r_2) n_2 I^{4/5}$$

积分上式得：

$$Q = \frac{n_2(r_2, t)}{n_2(r_2, 0)} = \exp \left[-4 \times 10^{-4} E(R, r_2) I^{4/5} t \right] \quad (13)$$

计算(13)式表明：雨滴对 $r_2 < 1 \mu\text{m}$ 的碘化银粒子冲刷引起浓度减小可以忽略，许绍祖等(6)计算了长江梅雨对大气气溶胶粒子冲刷，结论和按(13)式计算一致，半径 $0.01 - 1 \mu\text{m}$ 气溶胶粒子，经上百分钟梅雨冲刷，浓度损耗在3%以下。

四、结论

1. 分散在 $10^\circ\text{C} - -4^\circ\text{C}$ 云区碘化银粒子，将经受各种损耗；在云中降水区，碘化

银粒子将经受显著的损耗,主要是它们作为凝结核转化为云滴,或被云滴凝聚,以后这些云滴被降水粒子冲刷而不能到达低温区成为冰晶。

2. 37mm人工降雨防雹弹尚有如下问题急待解决:

①射高低,不能直接将碘化银送入 -4°C 层以上云区核化,将经受各种损耗。

②弹丸碎片较大,往往造成事故。

③碘化银成核率太低。

3. 为减小碘化银在 -4°C 层以下的各种损耗,高炮作业应在雷达指挥下实施,以保证碘化银能在上升气流区分散后被挟带到 -4°C 层以上云中核化。

参 考 文 献

- (1) 梅森,云物理学,科学出版社,1979.
1a) p.125, 1b) p.228, 1c) p.120-123,
1d) p.596, 1e) p.28, 80, 1f) p.90.
- (2) 弗列却,雨云物理学,科学出版社,1963.
2a) p.136, 2b) p.106.
- (3) 图梅,大气气溶胶,科学出版社,1984.
3a) p.113, 3b) p.112, 3c) p.76-80.
- (4) Zhou Hesheng, Artificial stimulation of precipitation by antiaircraft guns, 5th WMO Scientific conference on weather modification and applied cloud physics, p.579-581, Beijing, China 8-12 May 1989.

The loss of AgI aerosols in clouds during weather modification operation

Chen Wankui

Yan Caifan

(Academy of Meteorological Science)

Abstract

In this paper, the loss of AgI aerosols in the operative clouds has been calculated, it shows that the wash-out by rain is not neglectful. Therefore it is most important to increase the throwing height of the anticraft gun shells and to locate the AgI aerosols into the upwind regions of the clouds in sense of precipitation enhancement or hail suppression.