

尿 素 核 和 盐 核 的 凝 结 性 能*

叶家东 雷连科 谢文彰

(南京大学大气科学系)

尿素作为人工降水暖云催化剂,已有一些地区进行过外场作业和试验。但是关于尿素的凝结性能,详细的研究甚少。本文对尿素核的凝结增长性能进行了实验研究¹⁾。作为比较,对常用的暖云催化剂盐核的凝结性能也作了相应的研究。

1. 实 验 方 法

实验装置如图 1 所示,主要包括湿空气发生系统和观测系统两部分。湿空气发生系统基本上同[1],本实验主要对观测系统作了改进。湿空气引进安装在显微镜台上的凝结盒内。凝结盒为一圆筒形有机玻璃盒(图 1b),上方开一圆形口,供物镜伸入盒内进行观测,物镜筒上嵌套一有机玻璃盖,实验时隔离环境空气和观测者呼吸等因素的影响。凝结盒四壁开有四个圆形小孔,分别作为干、湿空气的进气孔和出气孔,以及凝结核托架和干湿球热电偶观测孔。这样,通入凝结盒内的湿空气较少受环境空气的干扰,使核滴的凝结增长过程较为稳定。

盐核大小的测量,当核滴凝结增长其中干核完全融解时,液滴处于饱和溶液状态,测量此时液滴直径,即可根据溶解度换算出干核等效直径 d_0 。尿素核凝结增长后再通干空气使其蒸发,所得干核一般均为球形或近似球形,本实验中一概以此球形干核直径 d_0 作为尿素核的等效直径。

实验时将凝结核悬挂在蜘蛛丝上进行观测,通湿空气后用显微摄影定时拍摄凝结增

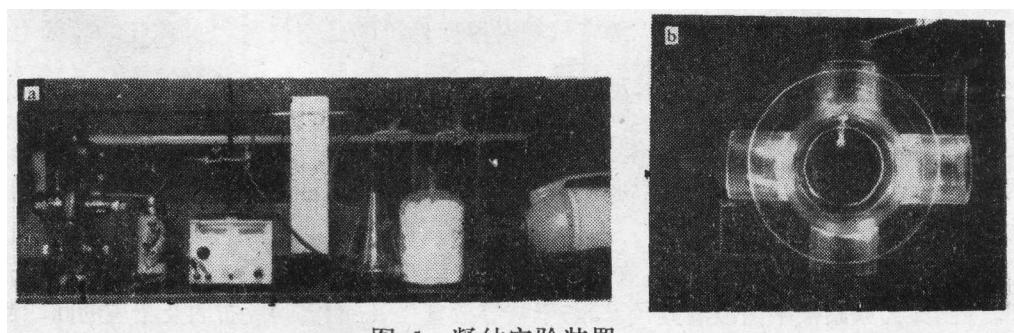


图 1 凝结实验装置
(a, 湿空气发生系统, b, 凝结盒)

* 本文于 1983 年 9 月 17 日收到, 1984 年 7 月 9 日收到修改稿。

1) 尿素核样品由四川省人工降雨办公室提供。

长过程。为了获得一定数量的凝结增长率资料,我们还用显微镜目测核滴的初始等效直径 d_0 和平衡液滴 d_m ,其间不测量增长过程,这样易于获得较多的凝结增长率 $K = \frac{d_m}{d_0}$ 的数据。

2. 实验结果

1) 尿素核的凝结增长性能

表 1 尿素核的凝结增长率

核 号	d_0 (微米)	d_m (微米)	$K = \frac{d_m}{d_0}$	$K_{15} = \frac{d_{15}}{d_0}$	f (%)
1	59	107	1.80	1.41	89
2	52	97	1.85	1.42	89
3	52	85	1.65	1.37	93
4	53	107	2.00	1.48	89
5	23	45	1.98	1.62	92
6	37	63	1.67	1.39	92
7	49	73	1.47	1.30	90
8	51	73	1.43	1.30	90
9	44	84	1.90	1.58	89
10	41	73	1.78	1.51	89
11	41	73	1.77	1.43	92
12	52	101	1.95	1.45	92
平均	46.2	81.5	1.77	1.44	90.5

(d_{15} 和 K_{15} 分别为凝结增长 15 秒时的液滴直径和相应的增长率)

尿素核的凝结增长率见表 1。由表中可见:

(1) 尿素核的起始吸湿性增长是十分迅速的,在相对湿度为 90%左右的湿空气中,开始 15 秒的平均增长率为 1.44,约占 4 分钟时增长率的 81%。这一阶段主要是溶液达到饱和以前的阶段,可称为吸湿性增长阶段。

(2) 从尿素核的凝结增长曲线看(图略),直至凝结增长时间达 4 分钟,尿素核滴仍有缓慢增长的趋势,表明在 90%左右的湿空气里,尿素核凝结增长达到平衡的时间是相当长的。我们来估算一下这个时间。

不计曲率影响^[1],溶液滴凝结增长公式可取^[2]

$$r \frac{dr}{dt} = \frac{f-1 + i \frac{\rho_s r_0^3 \mu_1}{\rho_l r^3 \mu_s}}{\left[\frac{L_s \rho_l}{K_r T} \left(\frac{L_s}{R_s T} - 1 \right) + \frac{\rho_l R_s T}{D_s e_s(T)} \right]} \quad (1)$$

式中 ρ_s 、 μ_s 和 ρ_l 、 μ_l 分别为溶质和水的密度和分子量, r_0 是干核的等效半径, D_s 是水气扩散系数, i 是溶质的离解系数, f 为空气相对湿度, $e_s(T)$ 是空气饱和水汽压, R_s 为水汽比气体常数, L_s 为水汽凝结潜热, K_r 是空气导热系数。若按表 1 中的 $r = r_m = \frac{d_m}{2}$ 时的增长速率估算,在 90%的相对湿度下为达到真正的平衡半径,需要 1 小时以上。当然后期的增长速率是十分缓慢的,所以我们仍取起始增长的前 3—4 分钟作为实验凝结增长的时限。

为了获得较多的凝结增长率数据,我们用显微镜目测法测量了尿素核的凝结增长率 K_m 。图 2 为尿素核平衡液滴直径 d_m 与干核等效直径 d_0 的实验散布图及相应的回归线,有关的统计量列于表 2。由表 2 可见,实验增长率的回归值是随干核增大而减小的,干核

1) 在本实验条件下,曲率项要比湿度项和溶液项小 2 个量级以上,故略。

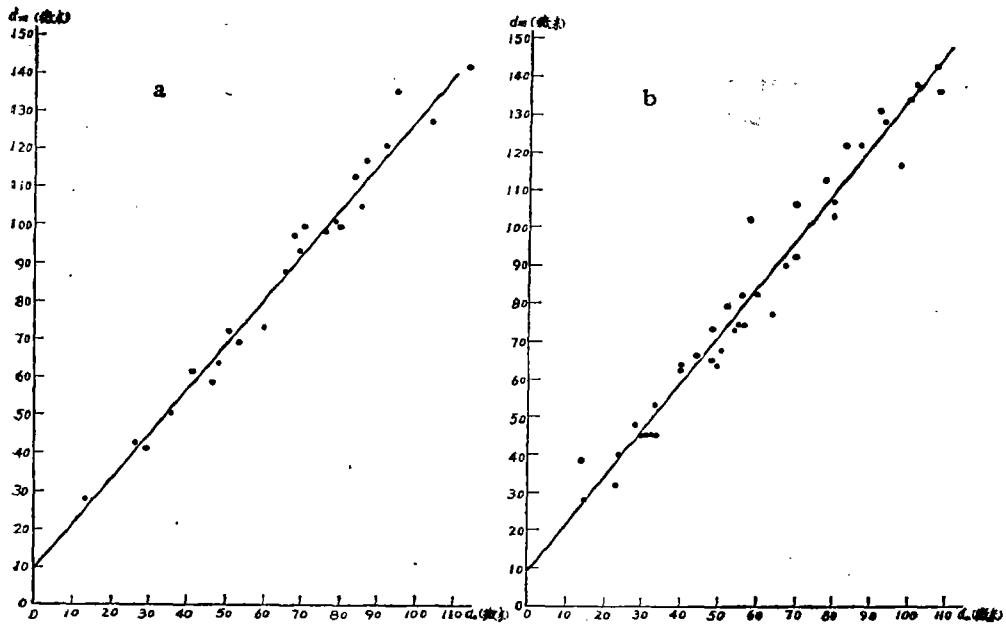


图 2 尿素核平衡液滴散布图及其回归线
(a, $f < 90\%$; b, $f \geq 90\%$)

表 2 尿素核凝结增长率和有关的统计量

K	相对湿度(%)		n	回归方程	r	\bar{d}_m 微米	\bar{d}_0 微米	统计平均 $K = \frac{\bar{d}_m}{\bar{d}_0}$	$\bar{K} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_i$		
	f	\bar{f}		$\hat{d}_m = a + b d_0$							
1	<90	85.7	24	$\hat{d}_m = 9.22 + 1.19 d_0$	0.99	88.7	66.5	1.33	1.37		
2	≥ 90	93.5	41	$\hat{d}_m = 8.91 + 1.26 d_0$	0.99	85.5	60.7	1.41	1.45		
3	合计	90.6	65	$\hat{d}_m = 9.30 + 1.23 d_0$	0.98	86.7	62.9	1.38	1.42		
K	d_0 (微米)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
1	$\hat{K} = \frac{\hat{d}_m}{d_0}$	2.11	1.65	1.50	1.42	1.37	1.34	1.32	1.31	1.29	1.28
2	$\hat{K} = \frac{\hat{d}_m}{d_0}$	2.15	1.71	1.56	1.48	1.44	1.41	1.39	1.37	1.36	1.35
3	$\hat{K} = \frac{\hat{d}_m}{d_0}$	2.16	1.70	1.54	1.46	1.42	1.39	1.36	1.35	1.33	1.32

d_0 从 10 微米增至 100 微米, 相应的增长率从 2.16 减小到 1.32。平均增长率 1.42, 如果只计 $d_0 = 20-60$ 微米的范围, 则相应的平均增长率约为 1.50。与表 1 相比较, 由于测量方法不同, 目测平均增长率大约要偏小 0.30。

2) 盐核的凝结增长性能

盐核的凝结增长率见表 3。由所列表可见:

表 3 盐核的凝结核增长率

相 片		d_0 (微米)	d_m (微米)	$K = \frac{d_m}{d_0}$	$K_{11} = \frac{d_{11}}{d_0}$	$f(\%)$
张 号	核 号					
(a)	1	27	76	2.82	1.96	90
	2	28	55	2.84	2.17	90
	3	8	25	2.99	1.60	90
	4	26	69	2.68	1.79	90
	5	22	65	2.99	2.06	90
	6	8	23	2.96	1.71	90
(b)	7	10	34	3.32	2.97	91
	8	6	19	3.28	2.68	91
	9	10	33	3.23	2.73	91
	10	9	29	3.18	2.66	91
	11	12	33	2.78	2.31	91
	12	12	39	3.31	2.57	92
(c)	13	44	120	2.74	1.92	90
	14	39	106	2.69	2.03	90
	15	8	26	3.28	2.65	90
	16	15	45	2.99	2.54	90
(d)	17	14	43	3.03	2.45	92
	18	12	37	3.05	2.40	92
	19	8	27	3.41	2.94	92
	20	43	116	2.70	1.74	92
(e)	21	14	48	3.42	2.55	92
	22	12	37	3.20	2.49	92
	23	25	69	2.73	2.05	92
(f)	24	10	33	3.23	2.75	92
	25	14	46	3.34	2.75	92
	26	12	37	3.17	2.54	92
	27	15	54	3.48	2.71	92
(g)	28	29	92	3.21	2.03	93
(h)	29	36	88	2.43	1.86	90
	30	42	110	2.63	1.70	90
(i)	31	46	118	2.55	1.55	90
平 均				3.02	2.29	91.0

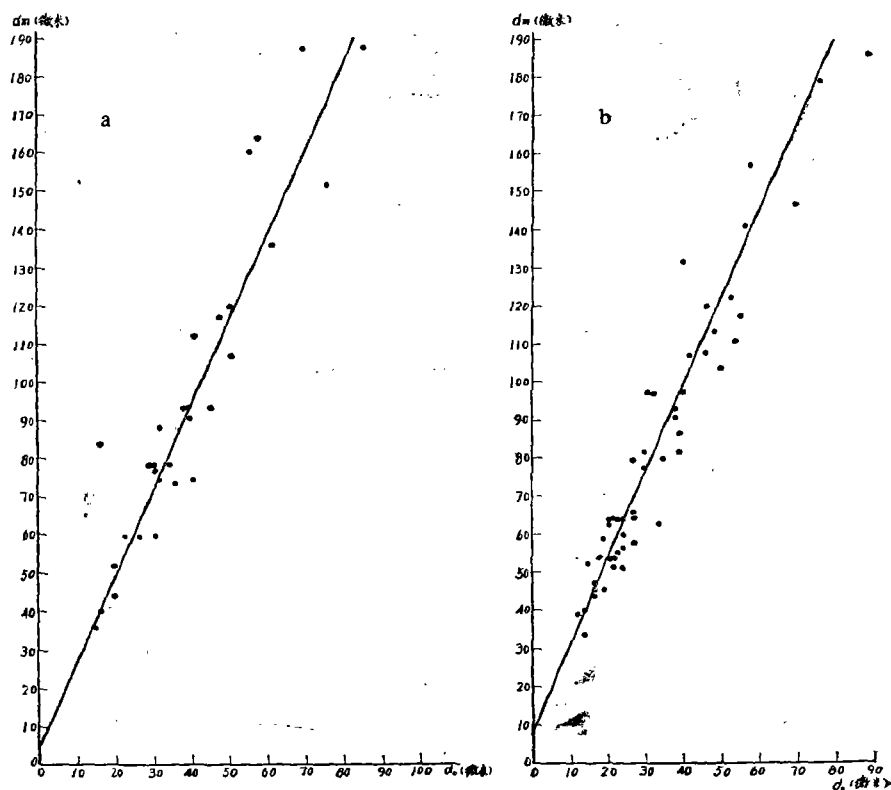


图3 盐核平衡液滴散布图及其回归线

(a, $f < 90\%$; b, $f \geq 90\%$)

表4 盐核凝结增长率和有关的统计量

K	相对湿度(%)		n	回归方程		r	\bar{d}_0 (微米)	\hat{d}_m (微米)	统计平均 $K_s = \frac{\bar{d}_m}{\bar{d}_0}$	$\bar{K} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_i$	
	f	\bar{f}		$\hat{d}_m = a + b d_0$							
1	<90	86.8	29	$\hat{d}_m = 4.53 + 2.23 d_0$		0.95	39.7	93.1	2.34	2.41	
2	≥ 90	93.8	53	$\hat{d}_m = 8.11 + 2.30 d_0$		0.95	34.4	87.2	2.53	2.60	
3	合计	91.3	82	$\hat{d}_m = 7.61 + 2.25 d_0$		0.95	36.3	89.3	2.46	2.49	
K	d_0 (微米)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
1	$\hat{K} = \frac{\hat{d}_m}{d_0}$	2.68	2.46	2.38	2.34	2.32	2.31	2.29	2.29	2.28	2.28
2	$\hat{K} = \frac{\hat{d}_m}{d_0}$	3.11	2.71	2.57	2.50	2.46	2.44	2.42	2.40	2.39	2.38
3	$\hat{K} = \frac{\hat{d}_m}{d_0}$	3.01	2.63	2.50	2.44	2.40	2.38	2.36	2.35	2.33	2.33

(1) 盐核的凝结增长性能明显地优于尿素核,在表3的实验温度下核滴直径的平均增长率达3倍左右。起始吸湿增长速率也更为迅速,15秒时的平均增长率 $\bar{K}_{15}=2.29$,约占实验平衡增长率的75%。

(2) 核小时实验平衡增长率一般较大,随着核增大,实验平衡增长率有减小的趋势,这是与增长时间限于4分钟之内有关的。从表3看出, $d_0 \leq 15 \mu$ 的小核,实验平衡增长率几乎都超过3倍,而 $d_0 > 15 \mu$ 的大核,只有28号核的增长率达到3.21倍,但此时湿空气相对湿度较大,达到93%。

为了获得较多的平衡增长率数据,用显微镜目测法测量了盐核的凝结增长率 K 。图3为盐核平衡液滴直径 d_m 与干核等效直径 d_0 的实验散布图及相应的回归线,有关统计量列于表4。由表4可见,与尿素核类似,盐核的实验平衡增长率的回归值也是随干核增大而减小的,干核 d_0 从10微米增至100微米,相应的增长率从3.01减少到2.33。平均增长率2.49,如果只计 $d_0=10-40$ 微米的尺度范围(与表3的核尺度相仿),则相应的平均增长率约为2.65。与表3相比较,主要由于测量方法不同,目测平均增长率大约要偏小0.37。

3. 讨 论

1) 实验平衡增长率与理论平衡增长率

由(1)式可得核滴凝结增长平衡半径 r_m 的理论平衡增长率 K_m :

$$K_m = \frac{r_m}{r_0} = \left[\frac{i \rho_s \mu_i}{\rho_l \mu_s (1-f)} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

对尿素核和盐核分别按(2)式计算 K_m ,结果列于表5。计算中对尿素取 $i=1, \rho_s=1.33$ 克/厘米³, $\mu_s=60.6$,对盐核取 $i=2, \rho_s=2.16$ 克/厘米³, $\mu_s=58.5$ 。表5中还分别列出由表1、表3归纳的实验平衡增长率。由表5可见尿素核和盐核的平均实验平衡增长率分别比理论计算值大0.17—0.10和0.44—0.62,盐核的偏差尤为明显。究其原因,大致有三个方

表5 尿素核和盐核的平衡增长率

		f(%)	80	85	90	92	95	98
尿 素 核	(2)式计算值 K_m		1.25	1.38	1.58	1.70	1.99	2.70
	表1的实验平均值 \bar{K}				1.75	1.80		
盐 核	(2)式计算值 K_m		1.88	2.07	2.37	2.55	2.98	4.05
	表3的实验平均值 \bar{K}				2.81	3.17		

表6 阿斯曼干湿表对热电偶干湿表的检定参数(%)

n	$f_{热}=a+bf_{阿}$	$\bar{f}_{热}$	$\bar{f}_{阿}$	s_y	s_x	s_y^2/s_x	s_y/s_x	$\hat{f}_{热}$	80	85	90	95	100
15	$f_{热}=7.18+0.93 f_{阿}$	92.7	92.4	5.62	5.89	1.91	1.38	$\hat{f}_{热}$	81.3	85.9	90.5	95.2	99.8

(1) 核滴大小测量误差：主要是干核大小测量比较困难，方法不同会产生系统偏差。由前面的分析知，显微摄影测量的增长率平均要比显微镜目测法偏大 0.30 左右。

(2) 湿度测量误差：表 6 是在湿度检定箱中用阿斯曼干湿表检定热电偶干湿表的检定参数。由表可见，在凝结实验的湿度范围内(80—98%)，热电偶干湿表测湿度有 0.2—1.3% 的系统正偏差。测量偶然误差，回归值的剩余标准差 $S_{y/x} = \pm 1.4\%$ ，合计湿度测量有 -1.2—+2.7% 的误差。

另外，由于凝结盒容积比较小，只有 20 立方厘米左右，内装干湿球热电偶，而且离核滴一般仅 1 厘米以内，湿球上水分不断蒸发，这对核滴凝结增长不无影响。这种影响一般总是使核滴附近空气湿度变大，在空气较干燥时这种润湿作用尤为明显。

(3) 理论平衡增长率的计算误差：凝结平衡增长率公式(2)是根据拉乌尔定律导出的，它适用于理想溶液。当溶液浓度较大时，与实际溶液偏差较大，反映在离解系数上，盐核的离解系数 i 是溶液浓度的函数¹⁾。考虑 i 随浓度的变化，对不同湿度下用迭代法求得相应的离解系数 i 并据以计算平衡增长率，结果列于表 7。可见当相对湿度小于 94% 时，表 5 中盐核的计算平衡增长率比表 7 中相应的计算值偏小 0.04—0.16。

表 7 考虑 i 是浓度的函数时盐核的平衡增长率

f (%)	80	85	86.5	90	92	93.8	95	98
i	2.57	2.35	2.30	2.15	2.10	2.02	1.95	1.85
K_n	2.04	2.18	2.26	2.43	2.59	2.79	2.96	3.95

综合上述讨论，尿素核和盐核的实验平衡增长率大约分别有 0.2—0.3 和 0.2—0.6 的偏差。

2) 尿素核和盐核作为暖云催化剂的效能

尽管在核滴大小和空气湿度的测量上还存在一些误差，但从显微摄影(图略)和有关数表可以看出，在 90% 以上的湿空气里，尿素核直径可凝结增长 1.5—1.8 倍，起始吸湿增长 15 秒即可达到 1.4 倍左右，而盐核的相应增长率则可达到 2.6—3.0 和 2.3 倍左右。在云内饱和或接近饱和的环境空气条件下，按公式(2)的增长率与空气湿度的关系推断，尿素核直径增长率可达 2.0—2.5 倍，而盐核则可增长 3.0—3.5 倍。作为暖云催化剂，与播撒水滴相比，1 吨尿素核相当于 6—12 吨水，而 1 吨盐核则相当于 12—20 吨水的效能。从凝结性能看，1 吨盐核的效能大约相当于 2 吨尿素核的效能。

参 考 文 献

- [1] 叶家东，人工凝结核的实验研究，气象学报，32 卷 3 期，232—239，1962。
 [2] B.J. 梅森，云物理学，中国科学院大气物理研究所译，科学出版社，1978。

1) 南京大学气象系，云物理学(讲义)，1978。