

人工造雾成雾过程微物理性能分析*

代梦艳, 吴文健, 胡碧茹

(国防科技大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要 通过对人造雾宏观性能和微物理性能变化过程的观测与分析, 研究了人造雾成雾过程和成雾机理, 并结合对云雾生长理论的分析比较了实际雾滴粒径分布范围、生长时间等与理论计算结果的异同。结果显示人造雾的雾滴粒径和生长时间与理论计算结果基本相符, 但其具体的生长过程与理论过程有所差别; 人造雾与天然雾相比, 雾滴数密度稍大, 但雾滴粒径和含水量稍小, 雾滴谱分布特点有所不同。

关键词 人造雾; 微物理性能; 成雾过程

中图分类号: TN219 文献标识码: A

The Analysis of the Microphysical Performances of the Artificial Fog Forming Process

DAI Meng-yan, WU Wen-jian, HU Bi-ru

(College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract The macroscopical properties and the changing of microscopical performances of artificial fog have been studied. In terms of the discussion of the forming theory of fog, the difference between experimental results and the theoretical calculation was compared. The results showed that the granularity and liquid water content of artificial fog droplet were a few less than that of the natural fog while the droplet concentration of artificial fog was higher than that of natural fog. Furthermore, the fog size distribution was different between them.

Key words artificial fog; microphysical performance; the forming process of fog

人造雾利用烟火剂的燃烧效应, 将特种催化剂气化分散形成合适粒径大小和分布的凝结核, 凝结核潮解吸湿后, 空气中的水汽冷凝包裹其上而形成小水滴, 最终形成浓密水滴组成的雾障。目前我们已完成了相关的理论和技术研究, 实现了自然条件下的人工造雾, 并具备了良好的光电遮蔽效果^[1]。

人造雾的成雾机理是受天然雾的启发而得, 但其实际成雾过程与天然雾形成机理有所不同。研究人造雾的成雾机理和成雾过程, 对于进一步提高成雾能力、改进人造雾的综合性能具有理论指导意义。因此, 本文对人造雾的成雾过程进行研究和分析, 并比较了实际成雾过程与理论计算结果的异同。

1 成雾过程分析

在造雾剂研制过程中尝试了多种系列的不同配方, 发现其中凝结核的粒径分布、数密度、凝水能力、凝水速度等的不同是导致雾滴微物理性能和成雾宏观性能差异的主要原因。

1.1 主要影响因素

凝结核和雾滴的微物理性能是造雾剂宏观性能差异的微观表征。由于某些凝结核最后未能吸水形成雾滴, 称能形成稳定雾滴的这部分凝结核为有效凝结核。有效凝结核多, 实际形成的雾滴数密度大。成雾初期生成的雾滴越多, 说明有效凝结核越多, 凝水能力越强。而初始小雾滴生长速度主要与凝结核的平均凝水速度有关, 凝水速度越快, 雾滴长大得越快, 平均粒径和含水量越大。我们在 33m³ 烟室内对不同造雾剂成雾微物理性能的差异进行了研究, 结果如表 1 所示。其中凝结核数密度指造雾剂燃烧

* 收稿日期: 2006-08-30
基金项目: 国家部委预研项目
作者简介: 代梦艳(1981—), 女, 博士生。

后,在烟室单位体积内产生的凝结核个数。文中提及的雾滴粒径除特殊说明,一般指直径。

由表1可知,M型造雾剂凝结核的凝水能力强、凝水速度快,在低湿度下就可迅速凝结成雾滴,因而采集不到初始凝结核;成雾后,雾滴的平均粒径和含水量最大,粒径分布范围宽。D型和M型造雾剂凝结核的凝水性能较前者要差,其中D型造雾剂有效凝结核的含量少,雾滴数密度较小;因凝结核凝水速度较慢,雾滴的平均粒径和分布范围都较小。E型造雾剂有效凝结核含量较多,凝水能力较强、凝水速度较快,因此形成雾滴的平均粒径和分布范围都较大。凝结核的凝水速度也决定了雾障的形成时间和稳定时间。凝结核的凝水速度快,则成雾时间快,雾滴粒径大。雾滴的粒径分布、数密度、含水量等与雾障的光电遮蔽性能有关^[2]。

表1 不同造雾剂的微物理性能差异

Tab.1 The microphysical characteristic of different fog aerosol

造雾剂	N 个/cm ³	T /°C	f /%	微物理性能			V/m	雾滴粒径 分布范围
				$\bar{d}/\mu\text{m}$	n 个/cm ³	W ⁻¹ g/m ³		
D	3600	18	80	4.13	1156	1.20	5	2~6 μm
E	975	18	80	6.27	696	1.04	4	2~8 μm
M	凝水速度太快,难以观察	18	80	8.86	403	1.56	4	4~15 μm

注:N:凝结核数密度; \bar{d} :雾滴平均直径;T:实验时烟室温度;f:相对湿度;n:雾滴数密度;W:含水量;V:能见度;凝结核采集在f为65%时进行,雾滴微物理过程观测时f为80%。表中微物理性能数据是作者使用自制凝结核采集装置统计和计算得到。

由上述可知,M型造雾剂凝结核的凝水性能最好,成雾时间短,可见光遮蔽效果最好;D型和E型造雾剂凝结核的性能稍差,可见光遮蔽效果也逊于前者。

1.2 成雾微物理过程分析

对造雾剂成雾后雾滴的生长变化过程也进行了跟踪观测,结果如表2所示。不同造雾剂成雾过程中雾滴生长、稳定、消散的变化规律是基本一致的,只是其中各生长阶段转变的时间稍有差异。

表2 不同造雾剂成雾微物理变化过程

Tab.2 The microphysical characteristic changing process of different fog aerosol

造雾剂	T/°C	RH/%	成雾过程中雾滴变化趋势
D	18	80	初始液滴较少,凝结核较多,粒径约1~1.5 μm ,约5min后雾滴数密度变大,雾滴平均粒径较小,约2~6 μm ;10min,3.9~5.2 μm ;20min后雾滴粒径开始减小,平均约2~3 μm 。
E	18	80	初始雾滴1~3 μm ,5min后明显增大,有大量7~10 μm 大雾滴,15min后数密度明显增大,小雾滴和大雾滴都较多,20min后雾滴数密度减小。
M	128	80	成雾开始1min时雾滴较大,有较多大雾滴(5~10 μm)及少量小雾滴(1~3 μm);10min时雾滴较大(9 μm ~13 μm);15min之后雾滴逐渐缩小,分布趋向均匀,粒径分布范围为2~5 μm 。

对D型造雾剂的成雾过程进行观察,统计其微物理性能和宏观性能变化趋势,结果见图1~3。由图中可知,成雾初期,雾滴的平均粒径比较小,数密度较小,成雾能见度较大,随着雾滴的平均粒径逐渐增大,雾滴数密度增大,雾变浓,能见度降低,但随着雾滴的粒径分布趋向一致,雾滴平均粒径逐渐减小,成雾的能见度又增大。

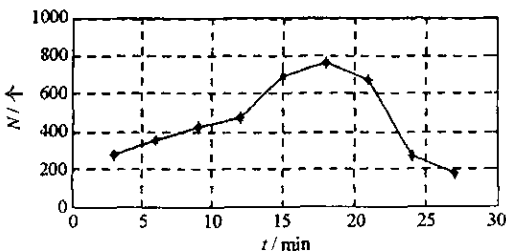


图1 雾滴数密度时间变化曲线

Fig.1 The change of number density of droplets with time

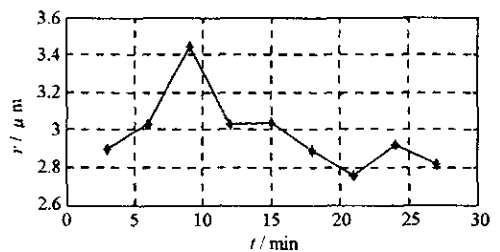


图2 雾滴平均直径时间变化曲线

Fig.2 The change of size of droplets with time

成雾过程中,雾滴的平均粒径和数密度随时间变化节点不完全一致,而人造雾的能见度变化正是这两个因素共同作用的结果。综合考虑二者,能见度最低点应在雾滴数密度和平均粒径都较大的时间段,即两者峰值的中间时间点,由图3可知,成雾最浓时间一般为施雾10~15min后,这与图中雾滴微物理性能变化规律是相符的。

由上述讨论可知,造雾剂成雾的宏观性能和微物理性能主要与凝结核的成核率、凝水能力和凝水速度有关。因此,我们可以通过改进造雾剂中氧化剂和催化剂的种类与含量、调节造雾剂的燃温等,改变凝结核的成核率和凝水性能,调节和控制雾滴分布特点和含水量、数密度等微物理性能,从而提高人造雾的宏观成雾性能。

2 人造雾与天然雾的异同

天然雾的凝结核主要来源于大气中的可溶性粒子,实际大气中这种粒子的含量是相当少的,同时天然雾对环境条件的要求比较苛刻,如低温、相对湿度过饱和等,因此具有很大的随机性。而人造雾对环境条件的要求较小,在较大的温度和相对湿度范围内,只要有造雾剂提供粒径合适的凝结核,就可快速形成稳定的大面积雾障。对中国各地雾的微物理性能观测可知³¹,天然雾的雾滴数密度以城市雾最大,其量级为 $10^2 \sim 10^3$ 个/ cm^3 ;山区雾次之,一般为100~200个/ cm^3 ;海雾最小,平均为37.2个/ cm^3 。天然雾含水量以重庆市最小,小于 $0.1\text{g}/\text{m}^3$,其他各地雾约为 $0.1 \sim 0.5\text{g}/\text{m}^3$ 。相比之下,人造雾的凝结核较多,雾滴数密度较大,一般为500~1000个/ cm^3 ,但雾含水量较小,一般小于 $0.1\text{g}/\text{m}^3$ 。

雾滴谱是雾演变的主要表征量,其变化反映了各个阶段的热力学和动力学条件。初生的天然雾雾滴分布较均匀,雾滴谱较窄。在雾的发生过程中,大滴数量逐渐增多,小滴的比例相应减少,雾滴谱逐渐加宽。趋于消散阶段的雾,雾滴尺度相差较大⁴¹。而人造雾的发展和演变趋势与天然雾有很大不同。由表2可知,人造雾成雾初期,雾滴大小分布不均,雾滴谱分布集中在两极;之后雾滴的大小分布趋向均匀。在雾的发展过程中,大雾滴逐渐减小至消失,小液滴的比例和数量都在增加,雾滴谱逐渐变窄。

3 与理论计算结果比较

人造雾与天然雾的形成过程不完全相同。我们希望通过云雾动力学和热力学生长过程的理论分析,结合对人造雾成雾过程中微物理性能变化的观测结果,研究人造雾的成雾机理,将测定值与理论值进行比较,分析差异产生的原因。

3.1 热力学过程

云物理学中一般是通过柯拉方程来反映凝结核形成的雾滴半径与相对湿度的对应关系。根据柯拉方程⁵(以NaCl为例),温度为 T ,半径为 r 的溶液滴表面水汽压 E'_r 与同温度下纯水面饱和水汽压 E_∞ 有如下关系:

$$\frac{E'_r}{E_\infty} = 1 + \frac{C_r}{r} - \frac{C_n}{r^3} = 1 + \frac{3.3 \times 10^{-5}}{T \cdot r} - \frac{0.147m}{r^3} = \frac{f}{100} \quad (1)$$

其中, $C_r = \frac{2\sigma' M}{\rho'_1 RT}$, $C_n = iBM'$, $B = \frac{3M}{4\pi\rho'_1}$, $M' = \frac{m}{W}$, W 是溶质的分子量。 σ' , ρ'_1 分别为溶液的表面张力和密度, R 为通用气体常数, M 是水的分子量, ρ_1 为水的密度, m 为以克为单位的溶质的质量, i 是范特霍夫系数,一般令 $i \approx 2$ 。由上式可知,溶液滴的饱和水汽压由三个因子所决定,一是温度效应,由 E_∞ 决定;二是曲率效应,由 $\frac{C_r}{r}$ 决定;三是溶质效应,由 $\frac{C_n}{r^3}$ 决定。对于不同大小的凝结核,根据上式可作出相对湿度与溶液滴半径的关系曲线(见图4),计算其平衡粒径(见表3)。由图4可知,在 $0 \sim 25^\circ\text{C}$ 范围内,相对湿度小于100%时,NaCl核形成溶液滴的粒径区别很小,因此可忽略温度对雾滴粒径的影响。

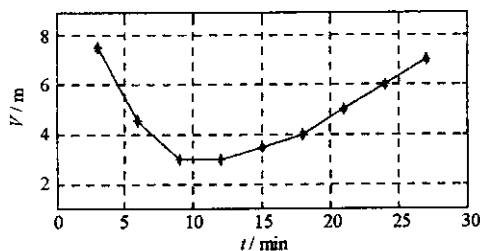


图3 人造雾能见度时间变化曲线

Fig. 3 The change of visibility of fog with time

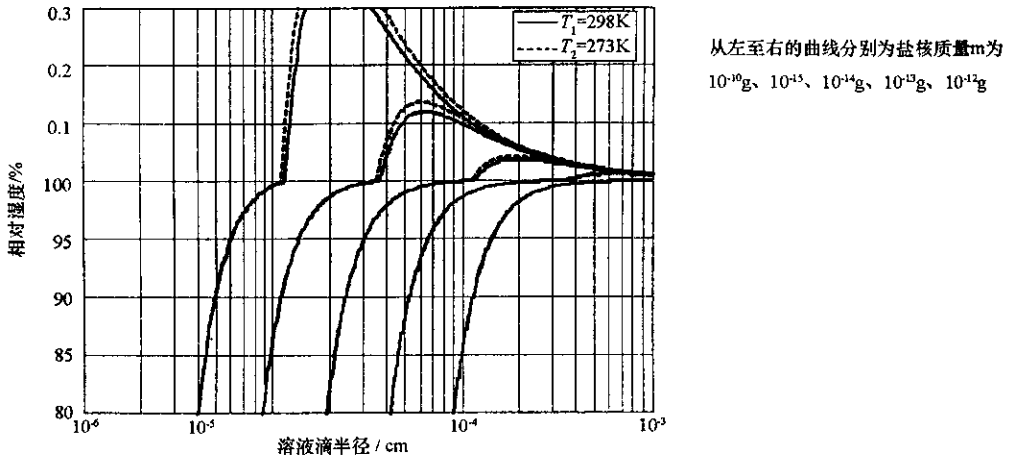


图4 NaCl 溶液滴半径与平衡相对湿度的关系

Fig.4 The connection of the size of droplets and the equilibrium relative humidity

表3 温度对溶液滴平衡半径的影响(T = 273K)

Tab.3 The influence of temperature on the equilibrium size of drople(T = 273K)

logm(g)	16	15	14	13	12	11	10	9	8
r_s	0.022	0.048	0.10	0.22	0.48	1.03	2.22	4.79	10.32
$r_0/\mu\text{m}(f=78\%)$	0.039	0.084	0.185	0.39	0.88	1.85	4.1	8.8	18.5
$r_1/\mu\text{m}(f=80\%)$	0.04	0.09	0.194	0.418	0.902	1.944	4.188	9.024	19.442
$r_2/\mu\text{m}(f=85\%)$	0.044	0.098	0.212	0.46	0.992	2.138	4.608	9.932	21.398
$r_3/\mu\text{m}(f=90\%)$	0.05	0.11	0.242	0.524	1.134	2.446	5.274	11.368	24.494
$r_4/\mu\text{m}(f=95\%)$	0.06	0.136	0.302	0.658	1.426	3.08	6.642	14.318	30.856
$r_5/\mu\text{m}(f=100\%)$	0.094	0.246	0.594	1.358	3.008	6.57	14.246	30.784	66.414

不同大小的盐核凝水形成溶液滴后,相对湿度变化时,粒径增大的幅度有所不同。质量越小的盐核,形成液滴的初始粒径越小,最后能达到的平衡半径越小。由表3可知,质量为 10^{-16}g 的盐核,在相对湿度为80%与100%时相比,溶液滴半径几乎变为原来的2.4倍,而质量为 10^{-8}g 的盐核,100%时的平衡半径为80%时的3.5倍。因此,在相同的湿度变化范围内,粒径越大的盐核长大的幅度越大。

D型造雾剂的主要成核物质为NaCl,因此可将理论值与测定值进行比较。通过电镜观测可知,D型造雾剂凝结核的粒径(直径)为 $0.2\sim 2\mu\text{m}$,由表3知,设定人造雾的成雾温度为 $0\sim 25^\circ\text{C}$,则其形成的雾滴在100%的相对湿度下能达到的最大粒径为 $1\sim 13\mu\text{m}$ 。而人造雾雾滴粒径的分布范围为 $2\sim 10\mu\text{m}$,这与理论计算结果基本相符,较计算值稍小一些。

3.2 动力学过程

对于溶质质量为 m ,分子量为 W 的溶液滴,根据单个盐溶液滴的动力学生长方程^[6]:

$$r \frac{dr}{dt} = \frac{(S-1) - 2\sigma M K (\rho_1 R T r) + im M K (\frac{4}{3} \pi r^3 \rho_1 W)}{KT (\frac{LM}{RT} - 1) + DM \rho_s (\frac{1}{T})} = \frac{(S-1) - \frac{3.3 \times 10^{-5}}{Tr} + \frac{0.147m}{r^3}}{KT (\frac{LM}{RT} - 1) + DM \rho_s (\frac{1}{T})} \quad (2)$$

由上式可计算出不同大小的凝结核长大所需的时间,如表4所示。如设定凝结核的质量为 10^{-12}g ,形成初始雾滴直径为 $1.5\mu\text{m}$,则要生长到 $4\sim 10\mu\text{m}$,只需1min;如凝结核的质量为 10^{-14}g ,要长大到直径为 $4\sim 10\mu\text{m}$,也只需2~9min。人造雾的稳定维持时间一般为20~30min,在前10min内雾滴缓慢长大,10min后由于相对湿度下降,水汽供应不足,雾滴逐渐减小,直至完全消失。

表 4 在 NaCl 盐核上形成水滴粒径由 r_0 增大到 r_1 的所需时间^[7] ($f=78\%$, $S-1$ 为过饱和度)Tab.4 The time needed for the size of the droplet grow from r_0 to r_1 ($f=78\%$, $S-1$ is the excessive saturation)

M_s (g)	r_1							备注
	1	2	5	10	15	20	25	
t (s)								
10^{-14}	2.4	130	1000	2700	5200	8500	12 500	$(S-1)=0.05$
10^{-13}	0.15	7.0	320	1800	4200	7400	11 500	$P=900 \times 10^2 \text{Pa}$
10^{-12}	0.01	0.61	62	870	2900	5900	9700	$r_0=0.75\mu\text{m}$

由上述讨论可知,人造雾雾滴的粒径分布范围和生长时间与理论值基本相符。但人造雾的雾滴粒径分布很不均匀,雾滴生长的时间和限度有限,实际粒径较理论值稍小。云雾生长理论是根据在假定的恒定环境中单个雾滴生长过程的计算结果,因而计算得到的雾滴粒径分布均匀,生长时间也较长。但实际成雾环境中,温度、相对湿度等都不断变化,这种起伏场效应使得环境的水汽供应量有限,雾滴的生长受到限制,因此,人造雾的雾滴谱分布大小不均,雾滴生长过程受随机因素的影响较大,生长时间和生长限度有限,实际测定值与理论值有所差异。

4 结论

通过对人造雾的微物理性能和成雾过程的观测和分析,我们对其凝结核分布、凝水性能、雾滴粒径、数密度等微物理性能变化过程有了深入的了解,通过与云雾生长理论的计算结果进行对比,发现人造雾的雾滴粒径分布范围和生长时间与理论值基本相符,但由于起伏场效应等原因,仍存在一定差异。人造雾的雾滴生长过程与天然雾的不同主要体现在雾滴谱分布等方面,与天然雾相比,人造雾雾滴数密度稍大,但雾滴粒径和含水量稍小。人造雾成雾过程和成雾机理的研究,对于我们进一步提高人造雾的总体成雾性能、改进其光电遮蔽效果和更好的装备应用具有理论指导意义。

参考文献:

- [1] 代梦艳,吴文健,胡碧茹.雾的光电遮蔽性能探析[J].光电技术应用,2005,5(5):22-24.
- [2] 胡碧茹,吴文健,代梦艳,等.人造雾的微物理特征与光电遮蔽性能研究[J].红外技术,2005,27(5):367-371.
- [3] 李子华.中国近40年来雾的研究[J].气象学报,2002,59(5):616-624.
- [4] 王鹏飞,李子华.微观云物理学[M].北京:气象出版社,1989:229-239.
- [5] 梅森.云物理学[M].第2版.北京:科学出版社,1978:14-29.
- [6] 黄美元,徐华英,等.云和降水物理学[M].第2版.北京:科学出版社,1999:6-14.
- [7] Mason B J, Ghosh D K. The Information of Large Droplets in Small Cumulus[J]. Quart J. Roy. Meteor. Soc., 1957, 83(358):501-507.

