

文章编号:1001-9014(2006)02-0131-04

人造雾的红外遮蔽性能试验研究

胡碧茹, 吴文健, 代梦艳, 吴晓森

(国防科学技术大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要:针对当前红外无源干扰烟幕在宽广地域伪装方面存在的技术难题,提出造雾剂造雾是实施大面积无源干扰的较佳方式.讨论了造雾剂造雾的原理,研究了在不同温度和相对湿度条件下不同造雾剂成雾的微物理特征和红外遮蔽效果.结果表明,当相对湿度较大、温度较低时成雾的含水量大,对可见光和红外的遮蔽效果较好.当可见光能见度 $<1\text{m}$ 时,对 25m 处的人员靶标有较好的红外遮蔽效果,热像图上 40m 的人员靶标不能识别.

关键词:无源干扰;人工雾障;红外遮蔽性能

中图分类号:TN219 **文献标识码:**A

STUDY ON PROPERTY OF INFRARED OBSCUR OF ARTIFICIAL FOG

HU Bi-Ru, WU Wen-Jian, DAI Meng-Yan, WU Xiao-Sen

(College of Aerospace Technology & Materials Engineering,

National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: According to the difficult problems of the smoking screen for camouflage in large area, a new passive jamming method, which can make fog through compound of producing fog, has been put forward. The micro principle of artificial fog was discussed. The micro physical characteristic and photoelectric jamming of fog, which is in different temperature and relative humidity, were investigated. The results show that the fog with high water content has good photoelectric property for obscuring at low temperature and high relative humidity. When the visibility of fog is below 1m , the fog has good obscure effect for the target in 25m , and the target in 40m can't be distinguished from the surroundings on the infrared image.

Key words: passive jamming; artificial fog; infrared property for obscuring

引言

巡航导弹攻击已经成为现代战争精确制导打击的标准样式,其独特的地形匹配和景象匹配制导方式尚无有效的对抗办法,因为涉及地域宽广,故而预置式伪装措施所需的兵力、兵器和物质的数量和规模是完全不现实的.因此对快速形成宽广地域整体防护的技术手段提出了强烈的需求.烟幕是宽广地域伪装防护的首选方式,但还存在一时难以解决的困难.第一,要在平方千米量级宽广地域实施持续的烟幕布设,所需要的烟剂量和装备数量难以满足和保障.第二,笼罩在烟幕中的人员在心理和生理上难以承受.因此,烟幕无法实现宽广地域和城市防空所需的笼罩性防护.

而天然雾的雾滴尺寸范围是 $0.1 \sim 100\mu\text{m}$,是可

见光的天然遮障,对红外激光、热红外具有极佳的吸收和散射作用^[1,2],对毫米波也有一定的衰减^[3,4],它是一种全方位笼罩型遮障,持续时间长,能有效对付来自空中各个方位的威胁.而且其主要成分来自大气中的水气,大面积造雾所需的人工施布物质需求量小,也不存在污染和毒害问题,能实现宽广地域的快速布设.造雾剂造雾是模拟天然成雾机制,在空气中产生一定数量的人工凝结核,在一定的条件下凝结空气中的水气形成小水滴,最终形成具有很好红外遮蔽效果的雾障.该技术具有宽频谱、全方位笼罩、用量少、成本低、仿天然伪装等优点,是实现平方千米级别宽广地域快速伪装的较佳方式.

1 造雾剂造雾原理

根据天然雾形成的核化理论^[5],成雾的条件之

收稿日期:2005-05-11,修回日期:2005-09-28

基金项目:国防科研基金(41101050402)资助项目

作者简介:胡碧茹(1972-),女,四川成都人,副教授,博士研究生,主要从事军事化学与烟火技术研究.

Received date: 2005-05-11, revised date: 2005-09-28

一是需要有大量足够细的吸湿性凝结核.但常规的物理和机械方法不能得到成雾所需的亚微米级颗粒.本文利用烟火药燃烧产生的高温和气流冲击效应使催化剂物质分散成很细小的凝结核.因此,文中的造雾剂是由烟火剂和成核物质(又称吸湿性催化剂)组成.其中,成核物质对雾的形成非常关键,它必须能在一定湿度的大气中吸湿潮解,使其表面形成一层溶有成核物质的盐溶液滴膜,由于盐溶液滴的饱和蒸汽压比纯水低,致使其周围微观空间的空气层湿度达到或接近过饱和,为液滴的凝结及增长提供了动力.所以,雾形成机制的关键就是水气在可溶性核上的凝结,雾滴的增长主要是凝结增长.

影响凝结的重要因素是溶液滴的饱和蒸汽压下降,而根据 Kohler 方程^[6]

$$p_{sn} = \left(1 + \frac{C_r}{r}\right) \left(1 - \frac{C_n}{r^3}\right) p_s \approx \left(1 + \frac{C_r}{r} - \frac{C_n}{r^3}\right) p_s,$$

其中 $C_r = \frac{2\sigma}{R\nu\rho T}$, $C_n = \frac{4.3m_1}{\mu_1}i$, σ 为表面张力系数, i 为范德霍甫常数, p_{sn} 表示溶液滴的饱和蒸汽压, μ_1 为溶质的分子量, m_1 为溶质的质量, p_s 表示水平液面的饱和蒸汽压, r 为溶液滴的曲率半径.由此可见,液滴的平衡蒸汽压由 3 个因素决定:温度效应 $p_s(T)$ 、曲率效应 C_r/r 和溶液效应 C_n/r^3 .其中,温度效应属于自然因素,无法进行人工调控;曲率效应取决于凝结核的尺度大小,同时由于雾滴粒径一直在变,涉及到了雾滴增长的动力学过程;溶液效应取决于成核物质所形成的凝结核本身的性质和尺度.

根据上述原理,本文将筛选出的高吸湿性成核物质制成造雾剂,燃烧形成合适粒径的凝结核,使其能迅速凝聚空气中的水气而快速成雾,并研究了造雾剂在不同条件下成雾的红外遮蔽效果.

2 人造雾实验研究

2.1 高效成核物质的筛选及造雾剂的研制

实验中用静态吸附量和吸附率 2 个物理量评价

成核物质的吸湿性能,用重量法进行测试比较,即将烘干过的质量相近的成核物质按相等的面积摊开,置于一定的自然大气环境下,经过一定的时间间隔进行称量,直到重量基本保持稳定.通过测定静态吸附量,初步筛选出几种可为造雾剂所用的高吸湿性成核物质,即 A、C、M₁、M₂、B.

根据烟火学原理,设计造雾剂配方,通过对配方中氧化剂、粘合剂、燃烧剂和吸湿性催化剂成分的调控,按一定的工艺制备成造雾剂,采用三用滴谱仪采集雾样,在光学显微镜下观察雾滴的平衡粒径,用统计的方法计算雾滴的平均直径,并通过成雾的微物理性能和可见光遮蔽效果的测试优化配方.

取含不同吸湿性催化剂的造雾剂在温度为 16℃,相对湿度分别为 52%、63%、72%、80% 和 91% 条件下造雾,其成雾的微物理性能及可见光遮蔽效果如表 1 所列.

从表 1 看出,各类成核物质在不同相对湿度下成雾的最终粒径和成雾效果不同.相对湿度越大,凝结核凝结水气越多,雾滴平衡粒径越大;成雾最浓时,雾滴数密度越大,可见光遮蔽效果越好.在相对湿度很高(>90%)条件下,每种成核物质的成雾效果都非常好,且成雾时间明显较短,大约为 2~4min.在中高湿度下(70~80%),各成核物质成雾效果有一定的差异,M₁、M₂ 的可见光成雾效果比 A、C、B 好些,体现在雾滴数密度上有所不同.在相对湿度较低条件(50~60%)下,这种差异明显增大,M₁、M₂ 成雾效果较好,C 只能形成轻雾,而 A、B 几乎不成雾,这主要与各成核物质的物理化学性质密切相关,它们都有各自的潮解相对湿度阈值,只有当环境相对湿度高于该值时,成核物质才能吸潮,从而进一步凝结水气.

因此,筛选出的 5 种物质均可作为高湿度造雾剂的成核物质,而 M₁、M₂ 可作为低湿度造雾剂的成核物质.

2.2 造雾剂的红外遮蔽效果

试验 B 和 M₂ 2 种造雾剂在高相对湿度的造雾

表 1 各成核物质在不同相对湿度下成雾的微物理特征及成雾效果
Table 1 The effect and microphysical characters of fog at different RH%

| RH% | 雾滴直径(μm) | | | | | 雾滴数密度(个/cm ³) | | | | | 成雾最浓时间(min) | | | | | 可见光效果 | | | | |
|-----|----------|-----|----------------|----------------|-----|---------------------------|-----|----------------|----------------|-----|-------------|---|----------------|----------------|---|--------------|---|----------------|----------------|---|
| | A | C | M ₁ | M ₂ | B | A | C | M ₁ | M ₂ | B | A | C | M ₁ | M ₂ | B | A | C | M ₁ | M ₂ | B |
| 52% | × | × | 2.4 | 2.3 | × | × | × | 53 | 59 | × | × | × | 6 | 6 | × | × | × | d | d | × |
| 63% | × | 2.3 | 4.0 | 4.2 | 2.3 | × | 26 | 76 | 80 | 30 | × | 7 | 5 | 5 | 7 | × | d | c | c | d |
| 72% | 4.0 | 4.1 | 4.6 | 4.6 | 4.0 | 131 | 138 | 156 | 178 | 140 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | c | c | b | b | c |
| 80% | 4.5 | 4.5 | 5.4 | 5.3 | 4.5 | 208 | 215 | 320 | 328 | 228 | 3 | 3 | 2 | 2 | 4 | 雾很浓,1.5m 能见度 | | | | |
| 91% | 5.2 | 5.6 | 6.4 | 6.3 | 5.0 | 603 | 628 | 663 | 679 | 658 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 雾非常浓,1m 能见度 | | | | |

注:雾浓用 b 表示,较浓用 c 表示,一般用 d 表示,不成雾用 × 表示.

效果,用红外热像仪观察雾障对不同距离处(8m、25m、40m)3个人体靶标的红外遮蔽效果^[7].目标被雾障遮蔽前后红外热像图如图1~图3所示,造雾前后目标与背景的温差变化情况如表2所列.

雾障对目标的红外遮蔽效果评价主要有二方面,一是目标中高温部分与低温部分的温差,它决定目标的被识别特征;二是目标与背景的温差,它将决定目标与背景的融合程度,二者结合可评判雾障对目标的红外遮蔽效果.由表2可知,造雾剂B在造雾前后目标高低温部分的温差降低、目标高低温部分与背景的温差降低均高于造雾剂M₂;从图1~图3看出,造雾前,热像图中人的轮廓和环境背景很容易分辨.造雾剂B成雾后,环境背景逐渐变得模糊,人的轮廓变得不易分辨,尤其是40m处的人体靶源几乎与环境融合而完全不可见;造雾剂M₂成雾后,对人员的总体遮蔽效果不及造雾剂B,但对40m处

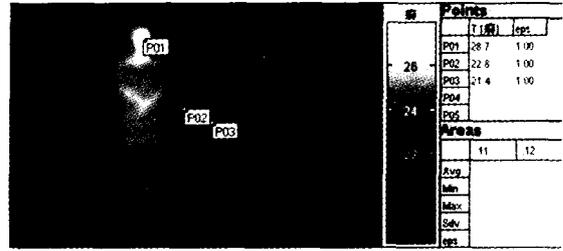


图3 造雾剂M₂成雾最浓时的红外热成像图
Fig.3 IR image of thick fog with M₂

的目标仍有较好的遮蔽效果.

因此从造雾前后温度差别的降低值以及热像图的目标识别程度可知,造雾剂B的红外遮蔽效果优于造雾剂M₂.

2.3 相对湿度对红外遮蔽效果的影响

在同一温度下,相对湿度是影响水气的凝结和增长的重要因素,同时直接影响形成雾障的含水量以及对红外的遮蔽效果.图4是显微镜观察的凝结核在不同相对湿度下形成雾滴的粒径,表3是某造雾剂在不同相对湿度下成雾前后目标(人体)与背景的温差变化.

从图4看出,初始凝结核的粒径约为1~3μm (<1μm的核难以分辨);当相对湿度为66%时,雾滴的平衡粒径为4~9μm,凝结核外包裹的水膜较薄;当相对湿度为89%时,雾滴的平衡粒径为5~13μm,凝结核外包裹的水膜较厚,形成的雾障含水量较高,而雾中较大的含水量对红外有较好的吸收.从表3看出,同一造雾剂在不同相对湿度成雾下对目标的红外遮蔽效果有很大的差异.相对湿度较低时,由于雾障的含水量低,造雾前后25m处目标高低温部分的温差降低、目标高低温部分与背景的温差降低值分别为3.8℃、4℃和0.7℃,降低幅度并不是很理想;当环境相对湿度较大时,凝结核凝结水气的效率较高,雾障的含水量相应增加,各种温差降低值逐渐增加,当相对湿度为89%时,上述温差降低值分别为5.6℃、5.9℃和1.3℃,热成像图上不能分辨目标.

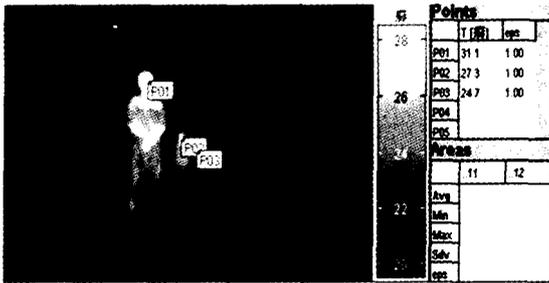


图1 造雾前的红外热成像图
Fig.1 IR image without fog

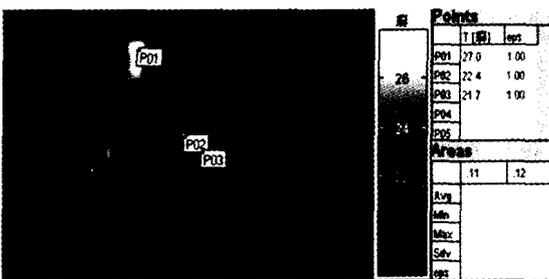


图2 造雾剂B成雾最浓时的红外热成像图
Fig.2 IR image of thick fog with B

表2 不同造雾剂成雾前后目标与背景的温差变化*

Table 2 The change of difference in temperature between target and background with different compounds (RH = 78%, T = 26°C)

| 距离 /m | 目标高低温部分的温差/℃ | | | | 目标高温部分与背景的温差/℃ | | | | 目标低温部分与背景的温差/℃ | | | |
|-------|--------------|-----|--------------------|-----|----------------|-----|--------------------|-----|----------------|-----|--------------------|-----|
| | 造雾剂 B | | 造雾剂 M ₂ | | 造雾剂 B | | 造雾剂 M ₂ | | 造雾剂 B | | 造雾剂 M ₂ | |
| | 造雾前 | 造雾后 | 造雾前 | 造雾后 | 造雾前 | 造雾后 | 造雾前 | 造雾后 | 造雾前 | 造雾后 | 造雾前 | 造雾后 |
| 8 | 8.6 | 4.8 | 8.7 | 6.3 | 10.9 | 5.8 | 10.8 | 7.3 | 2.0 | 1.0 | 2.1 | 1.2 |
| 25 | 4.5 | 1.0 | 4.6 | 2.7 | 6.7 | 1.3 | 6.8 | 2.2 | 2.2 | 0.8 | 2.3 | 1.2 |

*:目标的脸部为高温部分、膝盖为低温部分.

表 3 不同相对湿度下成雾前后目标与背景温差变化
Table 3 The change of difference in temperature between target and background at different RH%
($T = 22^{\circ}\text{C}$)

| 距离 /m | 相对湿度 /RH% | 目标高低温部分的 $\Delta T/^{\circ}\text{C}$ | | 目标高温部分与背景的 $\Delta T/^{\circ}\text{C}$ | | 目标低温部分与背景的温差/ $^{\circ}\text{C}$ | |
|-------|-----------|--------------------------------------|-----|--|-----|----------------------------------|-----|
| | | 前 | 后 | 前 | 后 | 前 | 后 |
| 25 | 66 | 8.9 | 5.1 | 10.2 | 6.2 | 3.0 | 2.3 |
| | 78 | 8.7 | 4.0 | 10.4 | 5.0 | 3.2 | 2.1 |
| | 89 | 8.8 | 3.2 | 10.5 | 4.6 | 3.1 | 1.8 |

*: 目标的脸部为高温部分、膝盖为低温部分。

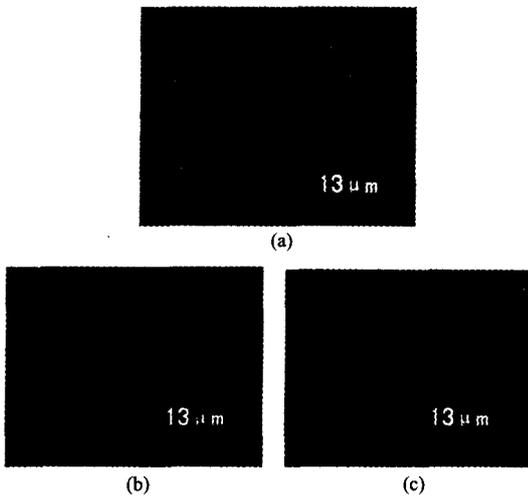


图 4 显微镜观察的凝结核和雾滴粒径图 ($\times 800$, $1.3\mu\text{m}$ /小格) (a) 初始凝结核 (b) $\text{RH}\% = 89\%$ 时的雾滴 (c) $\text{RH} = 66\%$ 时的雾滴
Fig. 4 Fogdrop observed by microscope ($\times 800$, $1.3\mu\text{m}$ per grid) (a) condensation nucleation (b) ffordrop at $\text{RH} = 89\%$ (c) fogdrop at $\text{RH} = 66\%$

2.4 温度对成雾效果的影响

温度是影响饱和蒸汽压的重要因素,同时也影响相对湿度,最终影响雾的红外遮蔽效果.表 4 是某型造雾剂在相对湿度为 75% 时不同温度下的成雾效果.

表 4 造雾剂在不同温度下的成雾效果
Table 4 The effect of fog at different temperature

| 温度 / $^{\circ}\text{C}$ | 成雾时间 /min | 含水量 g/m^3 | 可见光效果 | 造雾前后目标表观温度降低值/ $^{\circ}\text{C}$ |
|-------------------------|-----------|---------------------------|-------|-----------------------------------|
| 0 | 2 | 3.52 | 浓 | 14.7 |
| 5 | 2 | 3.06 | 浓 | 13.1 |
| 10 | 3 | 2.56 | 浓 | 11.4 |
| 15 | 4 | 1.98 | 浓 | 9.2 |
| 20 | 5 | 1.40 | 较浓 | 6.8 |
| 25 | 8 | 1.12 | 较浓 | 4.2 |
| 30 | 8 | 0.84 | 一般 | 2.1 |

注:目标(电炉)距热像仪距离为 18m.

从表 4 看出,温度在 $0^{\circ}\text{C} \sim 10^{\circ}\text{C}$ 时,成雾时间较短,为 2~3min,雾很浓,可见光效果很好.但随着温度的升高,雾的含水量降低,感觉较为干涩,同时红外遮蔽效果明显下降.主要是凝结核凝结水气的过程中,由于同时存在凝结和蒸发,当温度较高时,蒸发速度加快,致使平衡受到影响,使总的凝结速度大为下降,平衡雾滴的水膜厚度减小,使得雾在温度较低时的含水量大于温度较高时的含水量,从而导致同一相对湿度下,同一造雾剂在温度低时成雾的红外遮蔽性能较好.

3 结语

本文讨论了造雾剂成雾原理,通过测定物质的静态吸附量,筛选出 A、C、 M_1 、 M_2 、B 5 种可为造雾剂所用的高吸湿性成核物质,并对其组成的造雾剂进行了成雾的微物理性能和可见光效果研究,筛选出的 5 种物质均可作为高湿度造雾剂的成核物质,而 M_1 、 M_2 可作为低湿度造雾剂的成核物质.试验了不同造雾剂在不同相对湿度和温度下的造雾效果,结果表明,当相对湿度较大、温度较低时成雾的含水量大,对可见光和红外的遮蔽效果较好,当可见光能见度 $< 1\text{m}$ 时,对 25m 处的人员靶标有较好的红外遮蔽效果,热像图上 40m 的人体靶源与环境融合而不可见.

REFERENCES

- [1] ZHAO Zhen-Wei, WU Zhen-Sen, SHEN Guang-De, et al. Attenuation due to fog for $10.6\mu\text{m}$ wavelength [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (赵振维, 吴振森, 沈广德, 等. 雾对 $10.6\mu\text{m}$ 红外辐射的衰减特性研究. *红外与毫米波学报*), 2002, 21(2): 95—98.
- [2] Jaya Ramaprasad, Eric Eisenberg. Optical attenuation in fog and clouds [J]. *Proceeding of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2001, 4530: 58—71.
- [3] ZHAO Zhen-Wei, WU Zhen-Sen. Millimeter-wave attenuation due to fog and clouds [J]. *International Journal of Infrared Millimeter Waves*, 2000, 21(10): 1607—1615.
- [4] SHEN Guang-De, ZHAO Zhen-Wei. Sea fog effects on radiowave propagation at 3mm wavelength [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (沈广德, 赵振维. 海雾对 3mm 波传播特性的影响研究. *红外与毫米波学报*), 2000, 19(6): 478—480.
- [5] WANG Peng-Fei, Li Zi-Hua. *The Microphysics of Cloud* [M]. Beijing: Weather Publishing House (王鹏飞, 李子华. *微观云物理学*. 北京: 气象出版社), 1989: 67—68.
- [6] ZHANG Cheng-Chang. *Introduction of Weather Modification* [M]. Beijing: Weather Publishing House (章澄昌. *人工影响天气概论*. 北京: 气象出版社), 1992: 18—19.
- [7] LU Yuan, LING Yong-Shun, WU Han-Ping, et al. Study on passive distance measurement of ground objects by infrared radiation [J]. *J. Infrared Millim. Waves* (路远, 凌水顺, 吴汉平, 等. 地面目标的红外被动测距研究. *红外与毫米波学报*), 2004, 23(1): 77—79.