

文章编号: 1006-9941(2015)04-0362-06

镁粉对造雾剂燃烧性能的影响

代梦艳¹, 刘香翠¹, 闵娉婷², 方国峰¹, 刘江海¹, 陈春生¹, 张彤¹

(1. 防化研究院 国民核生化灾害防护国家重点实验室, 北京 102205; 2. 91746 部队, 北京 102206)

摘要: 采用 CAE (Chemical Equilibrium and Application) 软件对造雾剂的燃烧产物组成和燃烧反应热力学参数进行了理论计算, 使用红外测温仪、高速摄影仪和 X 射线衍射仪等对不同镁粉含量的造雾剂的燃温、燃速和燃烧残渣率进行了分析测试, 将二者进行了对比分析, 研究了镁粉对于造雾剂燃烧反应过程以及成雾可见光遮蔽性能的影响。理论计算结果表明, 平衡态燃烧产物中气相产物主要包括气化的氯化物和 CO_2 、 CO 、 H_2O 、 H_2 等, 凝聚相产物主要为 MgO 。实验结果表明, 镁粉对燃温、燃速的控制作用较大, 对燃烧反应和凝结核的生成和核化过程有重要影响。镁粉含量增加到 8% 时, 造雾剂的燃速迅速上升到 $1.26 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 燃温迅速升高到 2000 K。当燃温达到 1773 K 以后, 氯化物的核化过程顺利进行, 成雾的可见光遮蔽性能逐渐变好。实验结果与理论结果在燃温的变化趋势以及燃烧产物组成方面较为符合, 但理论值比实测燃温要高 300 ~ 500 K, 而燃烧残渣与理论计算的凝聚相产物含量方面有所差异, 镁粉含量小于 5% 时, 实测残渣率远大于凝聚相产物的理论值, 而当镁粉含量大于 6% 之后, 实测残渣率小于凝聚相产物的理论值。

关键词: 造雾剂; 镁粉; 燃烧反应; 燃烧产物

中图分类号: TJ55

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.04.010

1 引言

随着光电探测技术的飞速发展和应用, 以及云物理学的突破性进展, 雾的大气传播性能引起了人们的广泛关注^[1]。目前常用的光电探测波段主要集中在 $1.06, 3 \sim 5, 8 \sim 14 \mu\text{m}$ ^[2-4], 研究表明雾对于红外和可见光等波段的光电探测仪器有不同程度的影响, 原因与雾的微物理性能相关^[5-8]。因此, 通过人造云雾技术进行云雾的光电干扰性能的研究, 了解其对光电探测仪器的影响, 制定相应对策十分必要; 同时, 如能够通过人造云雾实现环境条件的可控, 也将为云物理学的研究创造新的研究手段。胡碧茹等^[9-10]指出人造雾障的物理形态和成雾机理与天然雾类似, 并对其微物理特性和光电遮蔽性能进行了研究, 但对于配方设计、燃烧产物与燃烧性能的相关研究还有待进一步深入。基于以上需求, 本课题组研制了造雾剂, 其组分为氧化剂、有机粘合剂、金属可燃剂(镁粉)、成核催化剂以及功能性添加剂等, 研究利用烟火剂的燃烧反应使成核

催化剂形成适当粒径分布的人工催化凝结核, 结核潮解吸湿后迅速凝结空气中的水汽生长成粒径为 $1 \sim 10 \mu\text{m}$ 的雾滴, 大量雾滴形成人工雾障, 产生良好的光电干扰效果。氧化剂和可燃剂组成的燃烧体系对于造雾剂的燃烧性能有很大影响。镁粉具有燃烧热值高、沸点低的特点, 使得火焰明亮、燃烧反应剧烈, 对于燃烧体系的构成具有至关重要的作用, 与燃温、燃速、发光发热效应和燃烧反应的完成度密切相关。为此, 本研究进一步测试了造雾剂的燃温、燃速、燃烧残渣等, 结合理论计算结果研究了镁粉对于燃烧性能以及成雾的可见光遮蔽性能的影响, 为了解造雾剂的燃烧反应过程, 建立凝结核核化过程与微物理性能的调控机制, 实现雾障综合性能的优化设计提供参考。

2 实验

2.1 配方设计

造雾剂配方组分包括氧化剂 A (45% ~ 75%)、可燃剂镁粉 (0 ~ 10%)、成核催化剂 H (5% ~ 20%)、粘合剂 C (8% ~ 22%) 以及功能调节剂 D (1% ~ 5%); 其中固定氧化剂、成核催化剂以及功能调节剂共计为 78%, 镁粉和粘合剂共计 22%。根据镁粉与粘合剂用量的不同, 研究设计了 7 组配方, 如表 1 所示。

收稿日期: 2014-02-18; 修回日期: 2014-05-14

基金项目: 国家自然科学基金资助(41205097, 51103176)

作者简介: 代梦艳(1981-), 女, 助理研究员, 主要从事发烟技术及相关装备的研究。e-mail: daidecai0558@163.com

按比例称取氧化剂、成核催化剂、功能调节剂等放入 60 °C 的烘箱中,烘干 4 h,加入镁粉混合均匀过 60 目筛,加入粘合剂 C 捏合均匀,浇注在直径为 50 mm,高度为 80 mm 的石墨罐体内,放置在 70 °C 烘箱中固化 4 ~ 5 d,得造雾剂样品 0[#] ~ 6[#],按密度 1.5 g · cm⁻³ 制成长度为 *h*(mm) 的药柱。

表 1 造雾剂的配方

Table 1 Main composition of the fog aerosol %

No.	Mg	adhesive C	No.	Mg	adhesive C
0 [#]	0	22	4 [#]	6	16
1 [#]	3	19	5 [#]	7	15
2 [#]	4	18	6 [#]	8	14
3 [#]	5	17			

2.2 仪器与实验方法

采用 TES-1336A 数位式照度计(台湾泰仕电子公司)测试可见光遮蔽性能。采用 D/MAX2200 型 X 射线衍射仪(日本 Rigaku 公司)测定样品的 X 射线衍射谱图。使用 DSR10N 红外测温仪(德国 Dias Pyrospot 公司)测定燃温,测温范围为 900 ~ 3000 °C。

在 4.4 m×3.3 m×3.4 m 烟室内进行造雾试验。烟箱内温度控制为 25 ~ 28 °C,相对湿度为 75% ~ 90%,造雾剂用量为 60 g,测试其燃烧性能和可见光遮蔽性能。

用 MotionXtra HG-100K 高速摄影仪(美国 Redlake 公司)和秒表测试造雾剂药柱的燃烧时间 *t*(单位: s),计算其线性燃烧速度 $v=h/t$, mm · s⁻¹。

由于造雾剂燃烧后的剩余反应物和凝聚态产物无法彻底分离,研究测试的燃烧残渣视为药剂燃烧后残留在石墨罐内的物质总量。令燃烧前的石墨罐体(连同造雾剂在内,造雾剂重为 60 g)总重为 *M*₁(单位: g),燃烧结束后,石墨罐体(连同燃烧残渣在内)重量为 *M*₂(单位:

g),则燃烧残渣率 η 为: $\eta = (1 - \frac{M_1 - M_2}{60}) \times 100\%$ 。

表 2 造雾剂配方的 CEA 计算结果

Table 2 Theoretical calculation results of the fog aerosol by CEA

formula	thermodynamic properties				content of different products/%							
	T/K	H/kj · kg ⁻¹	G/kj · kg ⁻¹	S/kj · (kg · K) ⁻¹	CO(g)	CO ₂ (g)	H ₂ (g)	X (g)	H ₂ O(g)	KCl (g)	MgO(c)	KCl(c)
0 [#]	1380	-3135	-14880	8.5061	44.05	3.28	30.06	2.88	4.68	5.05		5.53
1 [#]	1643	-3135	-16904	8.3793	39.57	3.99	24.05	4.64	7.74	12.31	3.76	
2 [#]	1823	-3135	-18281	8.308	38.13	4.05	21.69	4.91	9.00	13.33	5.11	
3 [#]	2015	-3135	-19695	8.2177	36.68	4.20	19.31	5.00	10.24	13.78	6.54	
4 [#]	2200	-3134	-20983	8.1144	35.03	4.49	16.83	4.97	11.37	13.98	8.02	
5 [#]	2365	-3134	-22053	7.9994	33.10	4.96	14.25	4.91	12.39	14.07	9.46	
6 [#]	2505	-3134	-22861	7.8748	30.84	5.67	11.65	4.85	13.29	14.13	10.79	

Note: g in bracket represents gas state, and c represents condensed phase. T, H, G, S represent combustion temperature, enthalpy, Gibbs free energy, entropy.

3 结果与讨论

烟火剂的燃烧过程将引发固相组分的晶体转变、熔融、沸腾、分解和气化等固-气、固-液反应,产生液相和气相,形成液相区、固相区和气相区并存状态。在燃烧过程中,气相产物经过冷凝成核、表面凝结和团聚作用而形成细微颗粒(<10 μm)。燃烧产物中的液相、固相等凝聚态组分以及剩余的反应物则成为燃烧残渣。造雾剂正是通过燃烧过程使成核催化剂经熔融-气化-冷凝成核过程形成粒度合适的人工催化凝结核,并借助燃烧产生的热气流将其分散和活化,凝结空气中的水汽而成为雾滴。凝结核的生成主要与气态氯化物的熔融、气化、挥发和冷凝等过程有关。由此可知,燃温、燃速和气体产物的扩散作用等对于气溶胶颗粒物(即凝结核)的成核过程和微物理性能等起到决定性作用^[11-12],进而对于人工凝结核的催化成雾性能产生影响。

3.1 燃烧反应的理论计算

根据表 1 的配方设计,使用 CEA(Chemical Equilibrium and Application)模拟计算了不同配方燃烧反应的热力学参数,如绝热火焰温度(*T*)、焓(*H*)、熵(*S*)、吉布斯自由能(*G*)等,以及主要燃烧产物组成,其中组成以摩尔分数表示,(小于 2% 的物质未标出),结果如表 2 所示。

从表 2 可以看出,随着镁粉质量的增加,造雾剂的燃烧焓(*H*)基本不变,但燃烧火焰温度(*T*)的变化较大,由 1380 K 上升到 2505 K,燃烧反应熵(*S*)和吉布斯自由能(*G*)则逐渐减小。

从表 2 还可以看出,燃烧产物中气相产物主要包括气化的 KCl、X 等氯化物和 CO₂、CO、H₂O、H₂等,其中的 KCl(g)、X(g)会在大气中冷凝成核形成人工催化凝结核。由于各组配方中吸湿性催化剂的用量相同,

除 0 号配方外,其余几组配方中气态氯化物的生成量都达到了燃烧产物总摩尔数的 17% ~ 19%。虽然 CO、CO₂、H₂O 和 H₂ 的总产气量随着镁粉含量的提高有所降低,但都达到了全部产物的 60% ~ 75%。因此,造雾剂燃烧反应中的产气量是比较大的,这部分高温气体会形成迅速上升的气流,可以起到携带凝结核升空和扩散的作用。凝聚相产物主要包括 MgO(c) 和 KCl(c),在燃烧结束后会冷凝为固体产物。1[#] ~ 6[#] 配方中主要的凝聚态物质是 MgO,其生成量与镁粉用量线性相关。MgO 的熔点和沸点很高,是燃烧残渣的主要组分。同时,在 0 号配方出现了 KCl(g) 和 KCl(c) 两种不同相态。KCl 熔点为 1043 K,沸点为 1773 K^[13],只有当燃温高于 1773 K 后,氯化物的核化过程才有可能顺利进行。而 0[#] 配方的燃温只有 1380 K,因此,燃烧产物中有大量氯化物以凝聚相 KCl(c) 存在并最终成为燃烧残渣。这表明燃温较低的情况下,会有相当一部分的氯化物不能完成气化-冷凝成核过程,从而明显降低人工催化凝结核的生成量。

由于 CEA 的计算结果表征的是假定绝热等焓条件下燃烧反应处于瞬间局部平衡状态下的物相组成和能量变化,与实际情况、测试方法、制备工艺、温度、压力等存在偏差^[14-15],因而,所得燃烧产物组成以及热力学参数的理论计算结果与反应过程的实测值必然存在一定差异。

3.2 镁粉含量对燃烧性能的影响

为验证理论计算结果,在烟箱中测试了造雾剂的实际燃温和燃速,对比结果见图 1 和图 2,其中,图 1 为镁粉含量与造雾剂燃温和燃速的关系,图 2 为镁粉含量与凝聚相产物和实际残渣率结果的对比。0[#] 配方中不含镁粉,实测燃温约为 1013 K,燃速为 0.7 mm · s⁻¹。随着镁粉用量的增加,造雾剂的燃温、燃速都迅速升高和增大,镁粉含量达到 8% 时,燃速迅速上升到 1.26 mm · s⁻¹,实测燃温值则上升到 2000 K。结合表 2 和图 1 可知,CEA 计算的燃烧温度与实际测定值的变化趋势类似,但理论值比实测燃温要高 300 ~ 500 K。表 2 中所得燃烧产物的组成与绝热火焰的温度直接相关,因此实际燃烧反应的完成度、燃烧产物的组成和相态也会与计算值有所不同,特别是冷凝物质的生成量和相态受燃温的影响较大,如氯化物和氧化物。

由图 2 可以看出,造雾剂实测残渣率随镁粉含量的增加呈现递减趋势,但理论计算得到的凝聚相含量则随镁粉含量增加而增加;两条曲线的交点在镁粉含

量 5% ~ 6% 处,在镁粉含量小于 5% 时,实测残渣率远大于凝聚相产物的理论值,而当镁粉含量大于 6% 之后,实测残渣率小于凝聚相产物的理论值。

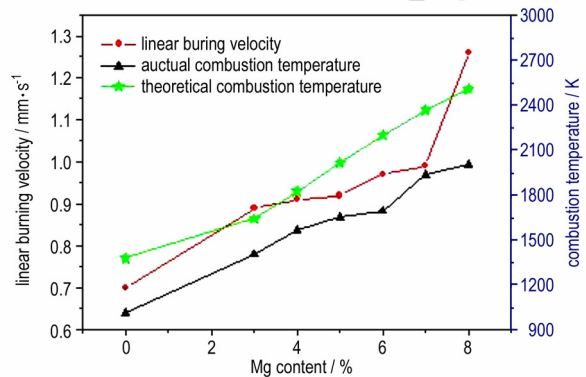


图 1 Mg 粉含量与实测燃温和燃速的关系

Fig. 1 Relationship of combustion temperature and linear burning velocity changing with Mg content

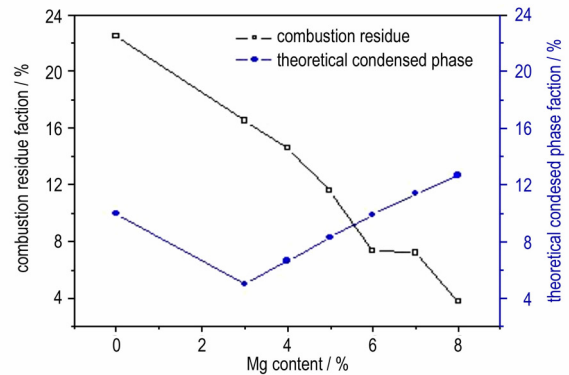


图 2 Mg 粉含量与理论凝聚相产物和实际残渣率的关系

Fig. 2 Relationship of calculated condensed phase products content and combustion residue changing with Mg content

实验中还可以发现,不同配方的燃烧残渣形态有很大差异(如图 3 所示),其中 0[#]、1[#] 配方的燃烧残渣呈现灰白色的坚硬球状/链状固体,这种结构对于燃烧产物的上升释放必然存在一定的阻滞作用;随着燃温燃速的增大,4[#]、5[#]、6[#] 配方的燃烧残渣逐渐转变为疏松细小的灰白色针状物结构,由于造雾剂燃烧过程中的产气量较大,在热气流的高速冲击作用下,可能会有一部分疏松的燃烧残渣被气体携带扩散到空中。

由图 1 可知,5[#]、6[#] 配方的燃温高,均已超过了 KCl 和 X 的沸点(1773 K)。在这种高温条件下,如果燃烧产物中的气态氯化物全部冷凝成核,则燃烧残渣里不应含有氯化物。图 4 为 6 号配方造雾剂燃烧残渣的 XRD 谱图,可知燃烧残渣中主要含有 KCl、X 和 MgO,即燃烧产物中除了 MgO 之外,还有部分氯化物以凝聚相存在。由此可知,即使在超过 2000 K 的高温

下,氯化物也不可能全部完成式(1)中的熔融-气化-冷凝核化过程而成为人工催化凝结核。



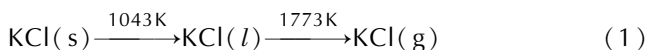
a. large spherical particles residue of fog aerosol 1#



b. small aciculae particles residue of fog aerosol 4#

图3 造雾剂的燃烧残渣照片

Fig.3 Photo of combustion residue of fog aerosol



从理论上说,温度越高,式(1)中的反应越容易向右进行,反应的完成度越高。由此可推知,0#~5#配方的燃温都比6#配方低,反应式(1)的完成度也更低,其燃烧残渣中含有一定量未能气化的氯化物,使得燃烧残渣的含量大于凝聚相产物的理论计算值。

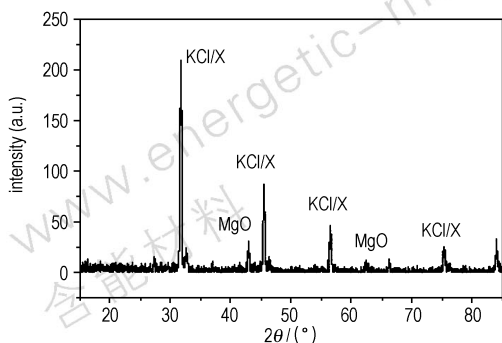


图4 6#配方造雾剂燃烧残渣的XRD谱图

Fig.4 XRD photo of combustion of fog aerosol 6#

结合图2、图3、图4可知,在燃温较低的0#~3#配方中,燃烧反应的完成度比较低,燃烧残渣中可能含有大量剩余的反应物以及因燃温较低而呈现凝聚态的燃烧产物,实际燃烧产物组成与理论计算值差别较大,同时由于结构坚硬的燃烧残渣的阻滞作用,使得实测残渣率大于凝聚相组分的理论计算值;而随着镁粉含量增加和燃温的升高,燃烧反应的吉布斯自由能不断减小(见表2),反应完成度逐渐增大,燃烧产物组成与理论计算结果的差异逐渐缩小,尤其是当5#、6#配方中镁粉含量大于6%以后,燃温高导致燃烧反应剧烈,燃烧残渣结构变得疏松,燃烧产生的热气流会将疏松的燃烧残渣携带至空中,使得实测残渣率小于凝聚相组分的理论计算值,这正是图2中两条曲线的变化趋势恰好相反的原因。

因此,造雾剂的燃温对于燃烧反应的进行程度、燃烧产物的组成以及氯化物的核化过程起到决定性作用。燃温的升高使燃烧反应的完成度提高,同时也降低了燃烧残渣对于气体产物上升扩散的阻碍作用,而氯化物可以顺利完成气化-冷凝-核化过程,这将有利于人工凝结核的高效释放、催化成雾性能的发挥和雾障遮蔽性能的优化。

3.3 造雾剂的可见光遮蔽性能

为进一步验证燃温对于凝结核核化过程和成雾性能的影响,在烟箱中测试了不同配方造雾剂形成雾障的遮蔽性能。由于相对湿度对于造雾剂成雾性能的影响较大,为排除相对湿度可能对配方性能所产生的干扰,确证不同配方的核化性能差异,比较了两种不同相对湿度条件下的成雾性能。图5为不同相对湿度条件下不同配方造雾剂的可见光透过率曲线。由图5可知,在不同的相对湿度下,不同配方造雾剂形成雾障的遮蔽性能的差异较为一致,其中0#和1#配方成雾稀薄,可见光透过率较大,遮蔽性能最差,3#配方稍好一些,4#~6#配方的成雾较浓,可见光遮蔽性能最好。由于相对湿度较高的条件下,空气中水汽含量充足,有利于凝结核催化成雾性能的发挥,高相对湿度条件下同一配方造雾剂雾障更浓,可见光遮蔽效果更好。

由3.1中的分析可知,造雾剂的燃温接近1773 K之后,燃烧反应和氯化物的核化过程得以顺利进行,由此可以解释这一现象:0#~3#配方的燃温较低,人工催化凝结核的生成量少,成雾性能差;而4#、5#、6#配方的燃温已经接近或超过1773 K这一临界值,造雾剂的燃烧反应以及凝结核核化过程的反应完成度较大,

燃烧产物组成与理论计算结果较为一致, 凝结核生成量大, 云雾催化效率高, 成雾浓度逐渐变大, 可见光遮蔽性能升高; 在此程度上继续升高燃温对于核化过程和云雾催化效率的影响有限, 因此 4[#]~6[#] 配方的成雾性能并不存在较大差异。

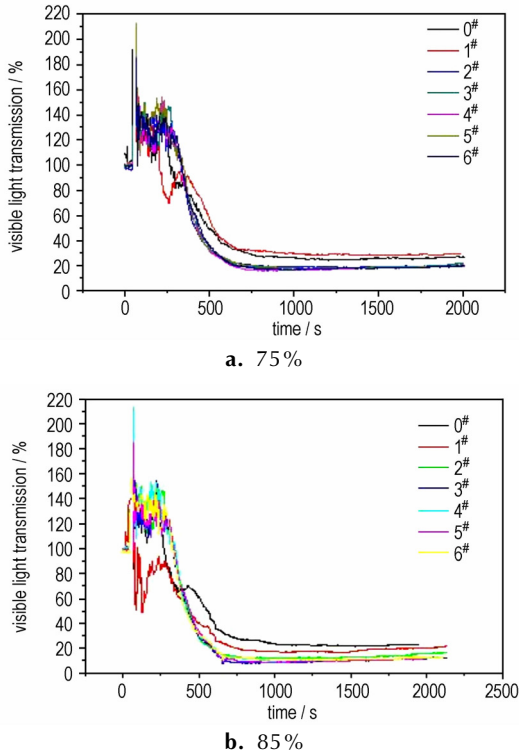


图5 不同配方造雾剂不同湿度下的可见光遮蔽性能

Fig. 5 Visibility light shielding performance of fog aerosol at different humidity

4 结论

(1) 理论计算结果表明, 1[#]~6[#] 平衡态燃烧产物中气相产物主要包括气化的氯化物和 CO_2 、 CO 、 H_2O 、 H_2 等, 凝聚相产物主要为 MgO 。

(2) 随着镁粉含量的提高, 燃温、燃速迅速增大。镁粉含量达到 8% 时, 燃速迅速上升到 $1.26 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, 燃温达到 2000 K 以上。通过对燃温、燃速的控制镁粉对燃烧反应、燃烧产物组成以及氯化物的生成和核化过程产生重要的影响。

(3) 造雾剂燃温达到了 1773 K 以上, 氯化物的熔融-气化-冷凝成核过程得以顺利进行, 人工凝结核的生成量大, 成雾的可见光遮蔽性能逐渐变好, 而燃温的进一步升高对于凝结核成核过程和造雾剂成雾性能的影响有限。

参考文献:

- [1] Vincent L, Deni B, Giles R. Performance assessment of various imaging sensors in fog[J]. *SPIE*, 1998, 3364: 66-80.
- [2] Kurt B, Hans G. Simulation of infrared detection range at fog conditions for enhanced vision systems in civil aviation[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2004, 8: 63-71.
- [3] Cohen D K, John H H, Devon G C. Characteristics of a chamber used for electrooptical device performance measurements in the presence of fog[J]. *Optical Society of America*, 1982, 21(13): 2399-2404.
- [4] Sutherland R A, Yee Y P, Fernandez G L, et al. Droplet size and transmittance spectra of mechanically generated water fogs[J]. *Atmospheric Research*, 1996, 3(41): 299-319.
- [5] 杜永成, 杨立, 张修峰, 等. 红外辐射在水雾中衰减计算的修正方法研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(10): 2632-2635. DU Yong-cheng, ZHANG Li, ZHANG Xiu-feng, et al. Study on the correctional method for the attenuation calculation of infrared radiation in the water fogs[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(10): 2632-2635.
- [6] 柯熙政, 马冬冬, 刘佳妮. 激光在雾中传输的衰减研究[J]. *光散射学报*, 2009, 21(2): 104-109. KE Xi-zheng, MA Dong-dong, LIU Jia-ni. Study attenuation of laser transmission in fog[J]. *Journal of Light Scattering*, 2009, 21(2): 104-109.
- [7] 沈娜, 张祥金, 郭婧. 水雾对激光引信的衰减[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(4): 864-868. SHEN Na, ZHANG Xiang-jin, GUO Jing. Attenuation of laser fuse through fog[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(4): 864-868.
- [8] 王勇, 于蕾, 张雅彬. 雾对大气激光通信系统的影响及克服方法[J]. *光子学报*, 2009, 38(12): 3275-3278. WANG Yong, YU Lei, ZHANG Ya-bin. Influence of fog on atmospheric laser communication system and the relevant methods[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(12): 3275-3278.
- [9] 胡碧茹, 吴文健, 代梦艳, 等. 人造雾的红外遮蔽性能试验研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2006, 25(2): 131-134. HU Bi-ru, WU Wen-jian, DAI Meng-yan, et al. Study on property of infrared obscour of artificial fog[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2006, 25(2): 131-134.
- [10] 代梦艳, 胡碧茹, 吴文健. 造雾剂燃烧过程研究及其对凝结核生长行为的影响[J]. *含能材料*, 2009, 17(6): 708-712. DAI Meng-yan, HU Bi-ru, WU Wen-jian. Combustion process of fog aerosol and its influence on condensation nucleus growth behavior[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2009, 17(6): 708-712.
- [11] 张明信, 王国志, 魏剑维, 等. 影响 Al_2O_3 凝相尺寸分布的因素[J]. *推进技术*, 2001, 22(3): 250-257. ZHANG Ming-xin, WANG Guo-zhi, WEI Jian-wei, et al. Factors influencing Al_2O_3 condensed phase sizing distribution[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2001, 22(3): 250-257.
- [12] 胥会祥, 赵凤起. 镁铝富燃料推进剂燃烧残渣影响因素理论分析[J]. *固体火箭技术*, 2006, 29(3): 200-203. XU Hui-xiang, ZHAO Feng-qi. Theoretical analysis on combustion residue of magnesium-aluminum fuel-rich propellant[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2006, 29(3): 200-203.
- [13] 田德余, 赵凤起, 刘剑洪. 含能材料及相关物手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011: 53.

- TIAN De-yu, ZHAO Feng-qi, LIU Jian-hong. Handbook of energetic materials and the related compounds[M]. Beijing: National defense industry press, 2011: 53.
- [14] Berger B. Parameters influencing the pyrotechnic reaction[J]. *Propellants Explosives Pyrotechnics*, 2005, 30(1): 27-35.
- [15] ZHAO Feng-qi, HENG Shu-yun, HU Rong-zu. A study of kinetic behaviours of the effective centralite/stabilizer consumption reaction of propellants using a multi-temperature artificial accelerated ageing test[J]. *Journal of Hazard Mater*, 2007(145): 45-50.

Influence of Magnesium on Combustion Performance and Artificial Fog Forming Performance of Fog Aerosol

DAI Meng-yan¹, LIU Xiang-cui¹, MIN Ping-ting², FANG Guo-feng¹, LIU Jiang-hai¹, CHEN Chun-sheng¹, ZHANG Tong¹

(1. State Key Laboratory of NBC Protection for Civilian, Research Institute of Chemical Defense, Beijing 102205, China; 2. Unit 91746 of PLA, Beijing 102206, China)

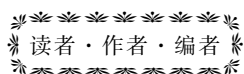
Abstract: Combined with the calculation results of combustion products and correlative thermodynamic properties of fog aerosol by CEA(Chemical Equilibrium and Application), the influence of Mg on combustion reaction and visibility light shielding performance was studied. The combustion temperature, linear burning velocity and combustion residue of fog aerosol with different Mg content were tested by infrared radiation thermometer, high-speed camera and X-ray diffraction. The theoretical calculation results show that the composition of equilibrium products includes gas state such as CO₂, CO, H₂O, H₂ and condensed state such as MgO. The experiment results show that Mg plays an important role in the combustion performance and the nucleation process of the coagulant nucleus by control of combustion temperature and linear burning velocity of fog aerosol. The combustion temperature and burning rate increases as the increasing of Mg. The combustion temperature reaches almost 2000 K and burning rate is 1.26 mm · s⁻¹ as the content of Mg is 8%. When the combustion temperature beyond 1773 K, the nucleation process of chloride finishes thoroughly and the visibility light shielding performance of artificial fog get better gradually. The experiment results are consistent with the theoretical calculation results on the variation tendency of combustion temperature and composition of combustion products, but the combustion residue is much different from the theoretical condensed phase faction.

Key words: fog aerosol; Mg; combustion temperature; combustion products

CLC number: TJ55

Document code: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.04.010



读者·作者·编者

《含能材料》高效毁伤弹药专栏征稿

高效毁伤弹药以“利用最小化成本获得最大化效果”为目标,对含能材料的性能和能量提出了更高的要求。为进一步促进高效毁伤弹药及其技术的研究,本刊将于2015年增设高效毁伤弹药专栏,内容涉及(1)传统含能材料的优化和改进以及先进含能材料的开发和应用,包括:传统含能材料合成、制造、处理和应用的新技术,新的CHON含能材料的开发和应用,金属化炸药,非传统概念炸药(如燃料空气炸药、温压炸药),高能量密度材料;(2)含能材料能量的控制输出研究,包括:能量输出增强(如组合装药),能量输出聚焦/定向,能量输出模式可控(如多模装药),能量输出范围可控(如低附带毁伤炸药)。欢迎广大学者投稿,来稿时请选择对应的专栏。

《含能材料》编辑部