

文章编号: 1006-9941(2008)02-0219-03

铝粉粒径对闪光剂辐射强度的影响

霸书红¹, 焦清介², 任 慧²

(1. 沈阳理工大学装备工程学院, 辽宁 沈阳 110168;
2. 北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京 100081)

摘要: 研究了铝粉粒径对闪光剂辐射强度的影响。利用粒径影响因子对闪光剂燃烧产物中凝聚相粒子的发射率进行了修正。结合铝粉燃烧模型、凝聚相产物发射率和闪光剂爆燃闪光辐射模型, 提出了铝粉粒径和闪光剂辐射强度的关系。理论分析得出了闪光剂配方中铝粉粒径越小, 其闪光辐射强度越高。测试了由不同粒径铝粉和高氯酸钾组成的二元闪光剂配方(质量比为 50/50)及由不同粒径铝粉、高氯酸钾和 3% 环氧树脂组成的三元闪光剂配方(质量比为 50/50/3)的闪光辐射强度, 验证了这一结论的正确性。

关键词: 军事化学与烟火技术; 闪光剂; 铝粉; 粒径影响因子; 辐射强度

中图分类号: TJ413.7

文献标识码: A

1 引言

铝粉在炸药、推进剂和闪光剂中应用较为广泛。其燃烧产物由部分汽化了的氧化物和以细液滴形式凝结下来的氧化物组成, 三氧化二铝的生成热很高, 燃烧较剧烈, 得到很高的火焰温度, 常被用作光效应烟火药中的可燃剂^[1]。铝粉粒径不同, 其燃烧产物粒径也不同的文献已有报道^[2], 但铝粉粒径对辐射强度的影响尚未见报道。本工作从理论和实验两方面研究了铝粉粒径对闪光剂辐射强度的影响, 为闪光剂的进一步研究提供理论依据。

2 铝粉粒径对闪光剂辐射强度的影响

2.1 铝粉燃烧产物粒径的理论预估

王宁飞博士^[2]根据相关的经典理论公式, 按铝粉蒸汽相扩散燃烧模型进行了参数计算和相关研究, 在假设凝聚态产物粒子为球形的基础上, 建立了铝粉燃烧的数学模型

$$D = \left[\left(1 + \frac{1}{\gamma} \right) \frac{\rho_{Al}}{\rho_{Al_2O_3}} \frac{80k_{Al}}{c} \right]^{\frac{1}{3}} d^{-\frac{2}{3}} = \eta d^{-\frac{2}{3}} \quad (1)$$

式中, D 是铝粉燃烧产物中凝聚态粒子的直径, cm; γ 是铝-氧反应化学计量比; ρ_{Al} 是铝的密度, $g \cdot cm^{-3}$; $\rho_{Al_2O_3}$ 是燃烧产物的密度, $g \cdot cm^{-3}$; k_{Al} 是铝颗粒燃烧常数; c 是比例常数; d 是可燃物铝粉的直径, cm。从该式可得出: 铝粉燃烧产物的平均粒径与可燃物铝粉直径的三分之二次方成反比。

2.2 闪光剂燃烧产物中凝聚相的发射率

闪光剂燃烧产物中凝聚相粒子的辐射常借助黑体辐射来研究。黑体发射率视为 1, 实际上黑体发射率不仅与其温度和波长有关, 而且也受其粒径影响^[3-6]。当黑体粒子的特征尺寸与其辐射的光波长相近时, 黑体辐射具有尺寸效应。McGregor^[4]应用热辐射平衡原理得到了黑体小粒子辐射修正公式

$$\frac{M_p(\lambda, T, D)}{M_B(\lambda, T)} = 1 - \frac{\lambda^2}{2 \cdot \pi^2 \cdot D^2} \quad (2)$$

式中, $M_p(\lambda, T, D)$ 表示黑体小粒子的单色辐出度, $M_B(\lambda, T)$ 表示同温度下黑体的单色辐出度, D 为黑体粒子直径, λ 为波长, 当 $\lambda < \sqrt{2} \pi D$ 时公式有效。这里将式(2)定义为黑体发射率粒径影响因子 k_b , 则有

$$k_b = 1 - \frac{\lambda^2}{2 \cdot \pi^2 \cdot D^2} \quad (3)$$

含铝粉的闪光烟火剂燃烧时, 其凝聚相产物粒子主要是三氧化二铝, 该凝聚相产物粒子辐射常视为灰体处理。它的发射率可借助黑体发射率粒径影响因子 k_b 来表示。用 ε_D 表示相同温度下灰体的辐射出射度与同粒径黑体的辐射出射度之比, 即灰体的发射率。则灰体小粒子的发射率可表示为

$$\varepsilon_D = \varepsilon \cdot k_b = \varepsilon \cdot \left(1 - \frac{\lambda^2}{2 \cdot \pi^2 \cdot D^2} \right) \quad (4)$$

式(4)表明灰体小粒子的粒径不同, 其发射率也不同, 粒径越大, 发射率越大。在燃烧温度和粒径相同的条件下, 粒子的发射率越大, 辐射强度就越高。

2.3 闪光剂的辐射强度

闪光剂的辐射主要来自其燃烧火球中凝聚相产物

收稿日期: 2007-08-30; 修回日期: 2007-11-21

作者简介: 霸书红(1970-), 男, 博士, 现从事特种能源与烟火技术教学和科研工作。e-mail: bashuhong.student@sina.com.cn

的连续辐射,常将其视为灰体辐射。若灰体发射率用凝聚相粒子的发射率 ε_D 表示,根据 Plank 定律和闪光剂爆燃辐射模型的基本假设,则闪光火球的辐射强度为^[7]

$$I_0 = \varepsilon_D \cdot r_0^2 \cdot \sigma T^4 \quad (5)$$

式中, r_0 是闪光火球的半径; σ 是斯蒂芬-玻尔兹曼常数; T 是燃烧温度。

假设粒径相同的铝粉燃烧时,生成的三氧化二铝粒子的粒径也相同。并将式(1)和(4)代入式(5),可得

$$I_0 = \varepsilon \cdot \left(1 - \frac{\lambda^2}{2 \cdot \pi^2 \cdot D^2}\right) \cdot r_0^2 \cdot \sigma \cdot T^4$$

$$= \varepsilon \cdot \left(1 - \frac{\lambda^2}{2 \cdot \pi^2 \cdot \eta^2 d^{-\frac{4}{3}}}\right) \cdot r_0^2 \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (6)$$

式中, I_0 是闪光火球的辐射强度; D 是铝粉燃烧产物中凝聚态粒子的直径; d 是可燃物铝粉的直径。当 $\lambda < \sqrt{2}\pi D$ 时公式有效。

由式(6)可以得出:在其它实验条件相同的情况下,铝粉的粒径越小,其燃烧产物中金属氧化物粒径越大,闪光火球的辐射强度就越高。

3 含不同粒径铝粉的闪光剂辐射强度

3.1 KClO_4 和不同粒径铝粉组成二元配方的辐射强度

为了验证上述理论分析,对不同粒径的铝粉和高氯酸钾组成的二元配方(质量比为 50/50)进行了爆燃闪光辐射强度的测试。所有样弹均采用 90 g 散装药,弹壳厚度 4 mm,容积为 102 mL,测试距离为 60 m,分别用 ST-80C 型照度计(测试范围为 400 ~ 700 nm)和

FZ-A 型辐射计(测试范围为 725 ~ 1050 nm)测试二元配方在不同波段的辐射强度,测试结果见表 1。

由表 1 可得:对于 KClO_4 和铝粉以相同配比组成的二元闪光剂配方,无论球形铝粉还是非球形铝粉,其可见光区和近红外波段平均辐射强度均随铝粉粒径的减小而增大,这与理论分析的结论是一致的。

3.2 KClO_4 、不同粒径铝粉和 3% 环氧树脂组成三元配方的辐射强度

为了进一步验证上述理论分析,对不同粒径铝粉、高氯酸钾和 3% 环氧树脂组成的三元配方(质量比都为 50/50/3)进行了爆燃闪光辐射强度的测试。实验条件同上,测试结果见表 2。

由表 2 可得:对于铝粉、 KClO_4 和 3% 环氧树脂组成的三元闪光剂配方(质量比都为 50/50/3),无论球形铝粉还是非球形铝粉,其可见光区和近红外波段平均辐射强度也随着铝粉粒径的减小而增大,这也符合理论分析的结果。

4 结 论

(1) 利用粒径影响因子对闪光剂燃烧产物中凝聚相粒子的发射率进行了修正,得出了可燃物铝粉粒径、凝聚态产物粒子的粒径和闪光剂辐射强度的关系为

$$I_0 = \varepsilon \cdot \left(1 - \frac{\lambda^2}{2 \cdot \pi^2 \cdot \eta^2 d^{-\frac{4}{3}}}\right) \cdot r_0^2 \cdot \sigma \cdot T^4$$

当 $\lambda < \sqrt{2}\pi D$ 时公式有效。

表 1 KClO_4 和不同粒径铝粉二元配方的辐射强度

Table 1 Radiation intensity of binary mixtures containing KClO_4 and Al powder

formulations	particle size of Al powder $d_{50}/\mu\text{m}$	visible region		near-infrared band	
		I_0/cd	\bar{I}_0/cd	$I_1/\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$	$\bar{I}_1/\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$
FLQT-0# Al/ KClO_4	30.32	7.95×10^7		2.16×10^5	
		7.89×10^7	7.92×10^7	2.19×10^5	2.17×10^5
		7.92×10^7		2.17×10^5	
FLQT-2# Al/ KClO_4	20.37	8.32×10^7		2.51×10^5	
		8.29×10^7	8.29×10^7	2.53×10^5	2.53×10^5
		8.27×10^7		2.54×10^5	
FLQT-3# Al/ KClO_4	10.50	9.80×10^7		2.66×10^5	
		9.75×10^7	9.76×10^7	2.65×10^5	2.67×10^5
		9.74×10^7		2.70×10^5	
FLT-4# Al/ KClO_4	35.4	6.42×10^7		1.62×10^5	
		6.39×10^7	6.42×10^7	1.59×10^5	1.61×10^5
		6.44×10^7		1.61×10^5	
FLT-5# Al/ KClO_4	20.42	7.29×10^7		1.78×10^5	
		7.31×10^7	7.28×10^7	1.72×10^5	1.75×10^5
		7.25×10^7		1.76×10^5	

Note: FLQT is the spherical particle, FLT is non-spherical particle.

表2 KClO₄、铝粉和3%环氧树脂三元配方的辐射强度Table 2 Radiation intensity of trinary mixtures containing KClO₄, Al powder and 3% epoxy resin

formulations	particle size of Al powder $d_{50}/\mu\text{m}$	visible region		near-infrared band	
		I_0/cd	\bar{I}_0/cd	$I_1/W \cdot \text{sr}^{-1}$	$\bar{I}_1/W \cdot \text{sr}^{-1}$
FLQT-0 [#] Al/KClO ₄ /3% epoxy resin	30.32	6.05×10^7	6.06×10^7	2.01×10^5	2.04×10^5
		6.09×10^7		2.06×10^5	
		6.03×10^7		2.05×10^5	
FLQT-2 [#] Al/KClO ₄ /3% epoxy resin	20.37	6.34×10^7	6.35×10^7	2.38×10^5	2.37×10^5
		6.37×10^7		2.33×10^5	
		6.33×10^7		2.40×10^5	
FLQT-3 [#] Al/KClO ₄ /3% epoxy resin	10.50	7.49×10^7	7.53×10^7	2.49×10^5	2.52×10^5
		7.55×10^7		2.51×10^5	
		7.54×10^7		2.55×10^5	
FLT-4 [#] Al/KClO ₄ /3% epoxy resin	35.4	4.88×10^7	4.90×10^7	1.52×10^5	1.51×10^5
		4.94×10^7		1.49×10^5	
		4.89×10^7		1.51×10^5	
FLT-5 [#] Al/KClO ₄ /3% epoxy resin	20.42	5.55×10^7	5.57×10^7	1.67×10^5	1.65×10^5
		5.56×10^7		1.63×10^5	
		5.61×10^7		1.66×10^5	

(2) 理论与实验均表明, 无论 KClO₄ 和铝粉组成的二元配方(质量比为 50/50), 还是铝粉、KClO₄ 和 3% 环氧树脂组成的三元配方(质量比为 50/50/3), 其可见光区和近红外波段的平均辐射强度均随铝粉粒径的减小而增大。

(3) 在保证闪光剂有较低机械感度的前提下, 选择小粒径铝粉做可燃物是提高闪光药辐射强度的有效途径之一。

参考文献:

- [1] 潘功配. 高等烟火学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2005.
- [2] 王宁飞. RDX-CMDB 推进剂的多相催化燃烧模型与实验研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2000.
- [3] Brookes J J, Moss B. Prediction of soot and thermal radiation proper-

ties in confined turbulent jet diffusion flame [J]. *Combustion and Flame*, 1999, 116(4): 486 - 503.

- [4] McGregor W K. On the radiation from small particles[J]. *J Quant Spectrosc Radiat Transfer*, 1978, 19(6): 659 - 664.
- [5] Sulzmann K G P. Comments on the notes by Slingo and by McGregor: on the radiation from small particles [J]. *J Quant Spectrosc Radiat Transfer*, 1979, 22(5): 505 - 506.
- [6] Cohen D L. A Model for the infrared radiance of optically thin, particulate exhaust plumes generated by pyrotechnic flares burning in a vacuum [D]. Lincoln Laboratory. Massachusetts Institute of Technology, 2000.
- [7] 霸书红, 焦清介, 杜志明. 强光致盲弹药技术的研究[J]. 含能材料, 2006, 14(2): 118 - 121.

BA Shu-hong, JIAO Qing-jie, DU Zhi-ming. Studies on the technology of the strong light blindness ammunition [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2006, 14(2): 118 - 121.

Effect of Particle Sizes of Aluminum Powder on Radiation Intensity of Flash Pyrotechnic Composites

BA Shu-hong¹, JIAO Qing-jie², REN Hui²

(1. School of Equipment Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110168, China;

2. State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: The emissivity of condensed-phase product particles was corrected by using impact factor of particle size. Combined with combustion model of aluminum, the emissivity of condensed-phase product particles and flash radiation model of pyrotechnic deflagration, the formula relationship between Al particles diameter and radiation intensities of pyrotechnic composite was put forward. It is concluded that the higher radiation intensity is, the smaller aluminum size of flash pyrotechnic composite is. Binary mixtures containing KClO₄ and Al with mass ratio of 50 : 50, and trinary mixtures containing KClO₄, Al and 3% epoxy with mass ratio of 50 : 50 : 3 were prepared, and their radiation intensities were determined experimentally. Results show that there is agreement between the theoretical conclusion and experimental results.

Key words: military chemistry and pyrotechnic technology; flash pyrotechnic composite; aluminum powder; impact factor of particle size; radiation intensity