

• 光电器件与材料 •

气流对Mg/Ba(NO₃)₂药剂燃烧性能的影响

过乐驹¹, 陈明华², 葛 强², 王韶光²

(1. 陆军工程大学, 石家庄 050003; 2. 军械技术研究所, 石家庄 050000)

摘要: 为了研究Mg/Ba(NO₃)₂药剂在气流状态下的燃烧光谱分布, 利用全波段辐射计在静态和通风状态下对Mg/Ba(NO₃)₂药剂的燃烧光谱进行了测试, 得到烟火药剂的燃烧光谱分布图。通过对Mg/Ba(NO₃)₂在静态和通风状态下燃烧光谱的实验分析表明, Mg/Ba(NO₃)₂药剂在静态和通风状态下主要能量辐射光谱范围在620~760 nm间, 强辐射峰的位置大致相同; Mg/Ba(NO₃)₂药剂在静态下燃烧时间为14.20 s, 壁温是1 298.23 °C, 通风状态为8.63 s, 壁温是593.36 °C。通风状态下, Mg/Ba(NO₃)₂药剂主要以强迫对流换热的形式散热, 静态下则主要以辐射的形式散热。

关键词: Mg/Ba(NO₃)₂; 气流状态; 燃烧光谱; 可见光; 对流换热

中图分类号: TQ567; TK16

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2017)-06-0044-04

Effect of Airflow on Burning Performance of Mg/Ba(NO₃)₂ Compositions

GUO Le-ju¹, CHEN Ming-hua², GE Qiang², WANG Shao-guang²

(1. Army Engineering University, Shijiazhuang 050000, China;

2. Mechanical Technology Research Institute, Shijiazhuang 050000, China)

Abstract: The burning spectrums of Mg/Ba(NO₃)₂ compositions are measured with the whole-band radiometer in a state of static and airflow in order to analyze the distribution of burning spectrums in the airflow. The burning spectrum distribution figures of pyrotechnic compositions are obtained. The main energy radiation spectrums of Mg/Ba(NO₃)₂ compositions in a state of static and air flow are in the range of 620~760 nm, and the position of the strong radiation peak is same. The combustion time of Mg/Ba(NO₃)₂ compositions is 14.20 s in a state of static, the wall temperature is 1 298.23 °C, and the combustion time is 8.63 s in a state of airflow, the wall temperature is 593.36 °C. In a state of airflow, the Mg/Ba(NO₃)₂ compositions are mainly dissipated in the form of forced convective heat transfer, and heat dissipation is mainly in the form of radiation in a state of static.

Key words: Mg/Ba(NO₃)₂; airflow condition; burning spectrum; visible light; convective heat transfer

作为常用的烟火药剂^[1-3], Mg/Ba(NO₃)₂药剂作用过程是在发射弹药达到弹道最高点, 随弹药一起运动, 并开始燃烧。在高速气流扰动下, 流场复杂, Mg/Ba(NO₃)₂药剂的燃烧性能与静态下的燃烧性能有所不同。Mg/Ba(NO₃)₂药剂燃烧性能的测试通常是在静态下进行, 为掌握药剂在气流条件下的燃烧性能, 对Mg/Ba(NO₃)₂药剂在通风状态下的燃烧性能进行研究。

近年来, 在通风状态下进行燃烧试验的研究逐渐受到国内外一些专家学者的关注。程旭东^[4]在通

风状态下对热塑性材料燃烧性能进行研究。陶常法^[5]则通过改变风速以及纵向风与燃料表面之间的风向角来研究通风状态对池火火焰长度的影响。曹宇^[6]研究了通风状态下柴油池燃烧特性和火灾蔓延规律。李权威等^[7-13]专家学者都对相关燃料在通风状态下进行了研究。

首先利用光谱仪对Mg/Ba(NO₃)₂药剂在通风状态下燃烧过程中的光谱分布和能量进行测试, 然后对试验数据进行处理, 得到Mg/Ba(NO₃)₂药剂在通风状态下燃烧过程中的光谱和能量分布, 并与静态

下燃烧的Mg/Ba(NO₃)₂药剂燃烧光谱图进行对比分析。

1 实验

1.1 试样

Mg、Ba(NO₃)₂与粘合剂造粒后压制成Φ20 mm×20 mm的药柱,其中,Ba(NO₃)₂65%,Mg15%,聚氯乙烯10%,酚醛树脂10%。

1.2 实验方法

利用Field Spec3光谱仪,所用传感器为25°镜头,所用其光谱范围为350~2 500 nm,光谱分辨率为3 nm@350 nm~1 000 nm,10 nm@1400,2 200 nm,误差为5%。

实验中,利用吹风机最大功率是出风口速度 $v=16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 经由管道自下而上对燃烧炉内的Mg/Ba(NO₃)₂药剂进行通风以模拟高气流状态下Mg/Ba(NO₃)₂药剂在弹体中的燃烧作用过程,如图1所示。测试并记录火焰燃烧所产生的可见光范围的燃烧光谱图。采样频率为0.2 s,每个样品进行10发试验。

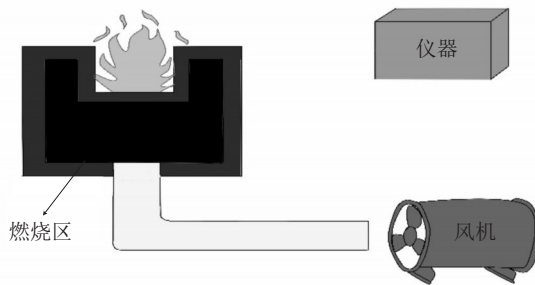


图1 实验仪器安放示意图

1.3 实验数据处理

实验得到燃烧光谱图,利用以下各式进行计算分析。从 λ_1 到 λ_2 的任意波段可以对燃烧光谱图进行定积分,即

$$I = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{\lambda} d\lambda \quad (1)$$

式中, I 为辐射强度,单位为 $\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{Sr}^{-1}$; λ 为波长,单位为nm。通过式(1)可计算Mg/Ba(NO₃)₂药剂在对应波长范围内的峰面积,从而得到辐射能量。

利用光谱图得到该波段平均辐射强度 \bar{I} ,即

$$\bar{I} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{\lambda} d\lambda}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (2)$$

通过式(2)可计算Mg/Ba(NO₃)₂药剂在对应波长范围内的平均辐射能量,进而计算偏差 D_{λ} ,偏差表示在 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 波长范围内的单色辐射强度和平均值的偏离程度,即

$$D_{\lambda} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (I_{\lambda} - \bar{I}) d\lambda}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (3)$$

相对于静态下受到自然对流换热影响的Mg/Ba(NO₃)₂药剂,通风状态下燃烧的Mg/Ba(NO₃)₂药剂受到强迫对流换热影响,并属于均匀换热,可以通过Newton冷却公式^[14]为

$$q = h(t_w - t_f) \quad (4)$$

其中, q 为热流密度,单位为 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$; h 为对流换热系数,单位为 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$; t_w 为壁面温度,单位为K; t_f 为流体温度,单位为K; $(t_w - t_f)$ 为对流传热温差,管内或槽内对流传热时,常取流道二处流动截面上流体平均温度,单位为K。

利用雷诺数 R_e 、努塞尔数 N_u 求对流换热系数 h 为

$$R_e = \frac{ul}{\nu} \quad (5)$$

$$N_u = CR_e^n Pr^m \quad (6)$$

式中, u 为实验流速,单位为 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; l 为燃烧区置药口直径,取值为0.30 m; ν 为运动粘度,单位为 $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$; C 、 n 、 m 等常数由实验数据通过查表确定。

辐射则是由于热量产生的,可由黑体的辐射力与热力学温度(K)的关系由斯忒藩—玻耳兹曼定律表示为

$$E_b = \delta T^4 = C_b \left(\frac{T}{100}\right)^4 \quad (7)$$

式(7)中, δ 为黑体辐射常数,取值为 $5.67 \times 10^{-5} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{k}^{-4}$; C_b 为黑体辐射系数,取值为 $5.67 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{k}^{-4}$,下标 b 表示黑体。实际物体的辐射为

$$E = \varepsilon E_b \quad (8)$$

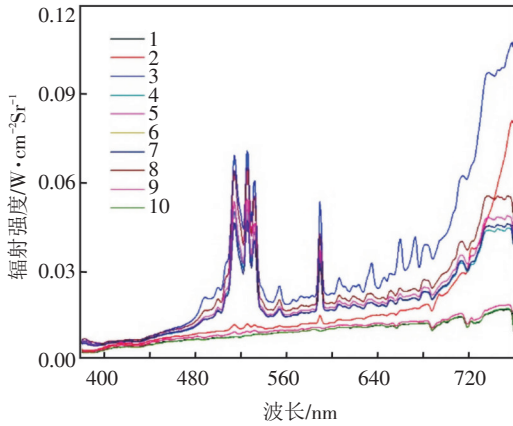
式(8)中, ε 为实际物体的发射率,仅和物体本身有关,与周围环境无关,取值为0.08。

2 实验结果与分析讨论

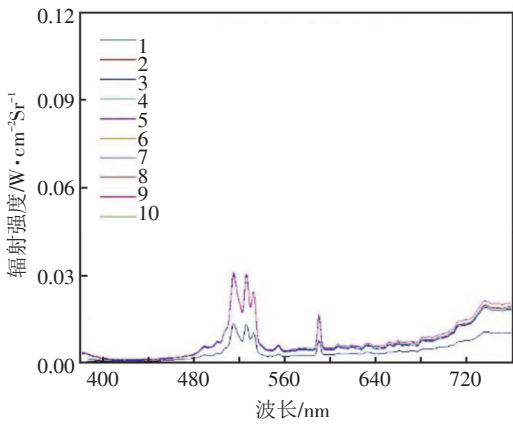
2.1 试验结果

通过对Mg/Ba(NO₃)₂药剂燃烧光谱的测量,得

到药剂在静态和通风状态下燃烧光谱的辐射叠加图,如图2所示。通过曲线拟合得到两者的辐射平均曲线,如图3所示。

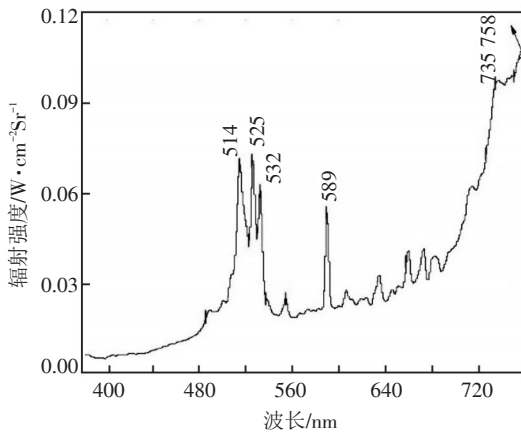


(a)静态下 Mg/Ba(NO₃)₂药剂辐射叠加图

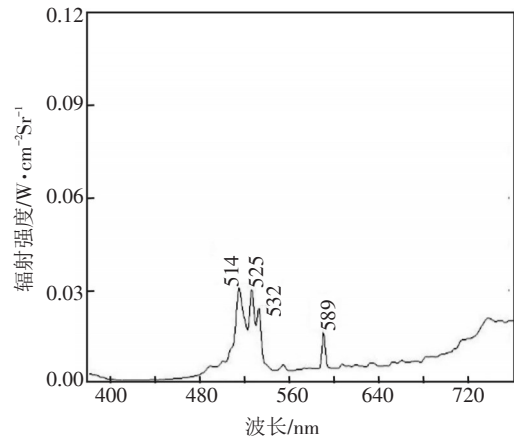


(b)通风状态下 Mg/Ba(NO₃)₂药剂辐射叠加图

图2 Mg/Ba(NO₃)₂药剂辐射叠加图



(a)静态下 Mg/Ba(NO₃)₂药剂辐射平均图



(b)通风状态下 Mg/Ba(NO₃)₂药剂辐射平均图

图3 Mg/Ba(NO₃)₂药剂辐射平均图

图2中的1~10表示仪器对药剂各组在燃烧时按时间顺序记录的数据。

2.2 Mg/Ba(NO₃)₂药剂燃烧光谱分析

对于 Mg/Ba(NO₃)₂药剂的燃烧光谱的数据计算分析结果如表1、表2所示。

表1 静态下 Mg/Ba(NO₃)₂组分燃烧光谱各类数据

波长/nm	占总能量的百分比/%	辐射强度/W·cm ⁻² ·Sr ⁻¹
500~578	21.13	2.54
578~592	3.30	0.40
620~760	60.40	7.26

波长/nm	平均单色辐射强度/W·cm ⁻² ·Sr ⁻¹	偏差/W·cm ⁻² ·Sr ⁻¹ ·nm ⁻¹
500~578	0.03	2.51
578~592	0.03	0.37
620~760	0.05	7.21

表2 通风状态下 Mg/Ba(NO₃)₂组分燃烧光谱各类数据

波长/nm	占总能量的百分比/%	辐射强度/W·cm ⁻² ·Sr ⁻¹
500~578	30.81	0.84
620~760	52.46	1.43

波长/nm	平均单色辐射强度/W·cm ⁻² ·Sr ⁻¹	偏差/W·cm ⁻² ·Sr ⁻¹ ·nm ⁻¹
500~578	0.01	0.83
620~760	0.01	1.42

通风状态下, Mg/Ba(NO₃)₂药剂燃烧的主要

能量辐射光谱范围在620~760 nm间,相较于静态下的燃烧,Mg/Ba(NO₃)₂药剂在通风状态下燃烧时的这一波段所占总能量比值有所下降,辐射强度和偏差都下降。静态下,Mg/Ba(NO₃)₂药剂在514 nm、525 nm、532 nm、589 nm、735 nm和758 nm这6个波长位置出现强辐射峰,特别是758 nm处出现最强峰;通风状态下,Mg/Ba(NO₃)₂药剂只在514 nm、525 nm和532 nm处出现强辐射峰,514 nm处出现最强峰。通风状态下,Mg/Ba(NO₃)₂药剂主要的强辐射光谱范围和静态下大致相同,但辐射强度要远远小于静态下的。

实验中,测得静态下Mg/Ba(NO₃)₂药剂燃烧时的壁面温度为1 298.23 ℃,室温为20 ℃。通风状态下,Mg/Ba(NO₃)₂药剂燃烧时,壁面温度为593.36 ℃。静态下,Mg/Ba(NO₃)₂药剂燃烧时间为14.20 s,通风状态下则只有8.63 s。经过查阅相关资料[14-15],得到静态下的对流换热系数 $h_{静}=8.23 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$,通风状态下的对流换热系数 $h_{风}=36.95 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

根据上文所述公式计算的结果如表3所示。

表3 Mg/Ba(NO₃)₂热力学参数

状态	燃烧时间/s	燃烧温度/K	对流换热系数/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
静态	14.20	1 571.38	8.23
通风	8.63	866.51	36.95

状态	热流密度/ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$	实际物体辐射/W
静态	10 519.83	27 656.55
通风	21 185.65	2 557.22

从表3可以发现,相对于静态下的燃烧,Mg/Ba(NO₃)₂药剂在通风状态下的燃烧时间减少,燃烧速度增加,对流换热系数远远大于静止状态下对应的对流换热系数,热流密度几乎是静止状态下燃烧的两倍,也反映出通风状态下,大量热是被空气带走的,只有极少数能量以辐射的形式散发,使Mg/Ba(NO₃)₂药剂辐射强度下降;静态下,Mg/Ba(NO₃)₂药剂主要以辐射的形式散发热量,受到对流换热的影响很小。

3 结论

(1)通风状态下,Mg/Ba(NO₃)₂药剂主要的辐射光谱范围和静态下的辐射光谱范围大致相同,燃烧

能量集中于500~578 nm和620~760 nm这两个波长范围内,强辐射峰的位置和静态下燃烧出现的强辐射峰位置基本一致。

(2)静态下的Mg/Ba(NO₃)₂药剂燃烧时间为14.20 s,测得壁面温度为1 298.23 ℃;通风状态下的Mg/Ba(NO₃)₂药剂燃烧时间为8.63 s,测得壁面温度为593.36 ℃。在380~760 nm可见光范围内,相较于在静态下燃烧的辐射能量,Mg/Ba(NO₃)₂药剂在通风状态下的各主要能量波段占总能量的比值有所下降,辐射强度要远远小于静态下的辐射强度。

(3)静态下燃烧的Mg/Ba(NO₃)₂药剂主要以辐射的形式散失燃烧能量,燃烧时间长,温度高,热流密度小;通风状态下燃烧的Mg/Ba(NO₃)₂药剂主要受到强迫对流换热的影响,燃烧能量主要以对流换热的方式散发,热流密度大,辐射形式散发的能量较少,燃烧温度较静态下有所下降,发光强度减少。

参考文献

- [1] 潘功配,杨硕.烟火学[M].北京:北京理工大学出版社,1997.
- [2] 潘功配.高等烟火学[M].哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2007.
- [3] 李学军,丛晓民,杜志明,等.几种含稀土元素烟火药剂的燃烧光谱分布[J].含能材料,2013,21(5):664-667.
- [4] 程旭东,梅鹏,陆松,等.通风条件对热塑性材料燃烧行为影响的试验研究[J].安全与环境学报,2011,11(1):211-215.
- [5] 陶常法,王喜世,张笑男.变风向通风对池火火焰长度的影响[J].燃烧科学与技术,2013,19(3):261-267.
- [6] 曹宇.通风环境中柴油池火的燃烧特性和蔓延规律[D].沈阳:东北大学,2013.
- [7] 李权威,秦俊,唐海东,等.纵向通风对正方形酒精池火燃烧速率影响的实验研究[J].中国科学技术大学学报,2010,40(7):757-763.
- [8] Blinov V I, Khndiakov G N. Diffusion burning of liquids[R]. U S. Army Translation:NTIS, 1961.
- [9] Capener E L, Alger R S. Characterization and suppression of aircraft fuel fires[R]. Monterey, CA: Section meeting of the combustion institute, 1972.
- [10] Apte V B, Green A R, Kent J H. Pool fire plume flow in a large-scale wind tunnel[A]. Proceedings of the third international symposium on fire safety science, London:Elsevier, 1991.

(下转第55页)

- radar[J]. SPIE, 2004, 5412: 257-263.
- [8] 赵宝升,陈敏.采用多狭缝条纹管实现激光三维成像[J].光子学报,2004,33(12):1426-1427.
- [9] 朱虹.数字图像处理基础[M].北京:科学出版社,2005:121-124.
- [10] 徐大纶.变像管高速摄影[M].北京:科学出版社,1990:93-94.
- [11] 曾庆勇.微弱信号检测[M].杭州:浙江大学出版社,1996.
-
- (上接第14页)
- damages to charge coupled device detector using a high-repetition-rate and high-peak-power laser[J]. Optics & Laser Technology, 2013, 47: 221-227.
- [48] 朱志武,张震,程湘爱,等.单脉冲激光对CCD探测器的硬损伤及损伤概率[J].红外与激光工程,2013,42(1):113-118.
- [49] 孙承伟.激光辐照效应[M].北京:国防工业出版社,2002.
- [50] 姜楠,张维,牛燕雄,等.脉冲激光辐照CCD探测器的硬破坏效应数值模拟研究[J].激光与红外,2008,38(10):1004-1007.
- [51] 王祖军,唐本奇,肖志刚,等.CCD辐射损伤效应及加固技术研究进展[J].半导体光电,2009,30(6):797-803.
- [52] 聂劲松,王玺,李化,等.1.06 μm 激光辐照CCD探测器的热力效应分析[J].红外与激光工程,2013,42(S2):380-386.
- [53] LI Ze-wen, WANG Xi, SHEN Zhong-hua, et al. Mechanisms for the millisecond laser-induced functional damage to silicon charge-coupled imaging sensors[J]. Applied Optics, 2015, 54(3): 378-384.
- [54] LI Ming-xin, JIN Guang-yong, TAN Yong. Functional degradation of CCD detector irradiated by millisecond pulse laser[J]. Optik, 2016, 26(16).
- [55] HUANG Shao-yan, ZHANG Yong-sheng, TANG Ben-qi, et al. Damage effect on CCD detector irradiated by 500 fs laser pulse[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2005, 17(10): 1445-1448.
- [56] ZHANG Yu. Study of damaging effect on paneled CCD detectors irradiated locally by pulse laser[J]. M A Dissertation, 2011.
- [57] SHAO Jun-feng, LIU Yang, WANG Ting-feng, et al. Damage effect of charged coupled device with multiple-pulse picosecond laser[J]. Acta Armamentarii, 2014, 35(9): 1408-1413.
- [58] 赵洋,金光勇,李明欣,等.毫秒脉冲激光损伤CCD探测器的实验研究[J].激光技术,2017.
- [59] 李化,王玺,聂劲松,等.脉冲宽度对CCD探测器激光损伤效果的影响[J].红外与激光工程,2013,42(S2):403-406.
- [60] 郝向南,李化,聂劲松,等.不同工作状态激光对可见光CCD的损伤实验[J].光电工程,2012,39(9):113-118.
- [61] 邱冬冬,张震,王睿,等.脉冲激光对CCD成像器件的破坏机理研究[J].光学学报,2011,31(2):0214006.
- [62] 雷鹏,孙可,张玉发,等.凝视光电成像系统猫眼回波特性的理论与实验研究[J].光子学报,2016,45(6):1-7.
- [63] 雷鹏,孙可,张玉发,等.猫眼回波探测1.06 μm 激光引发硅的损伤演化[J].红外与激光工程,2016,45(12):1-7.
- [64] 雷鹏,孙可,李化,等.猫眼回波图像随CMOS器件激光损伤变化的实验研究[J].中国激光,2016,43(6):1-7.
-
- (上接第47页)
- [11] Yank S S, Kim S C, Ryou H S. An experimental study on the effect of longitudinal ventilation on the variation of burning rate in tunnel fires[J]. Tunnel and underground space, 2005, 36(6):569-596.
- [12] 冯军,蒋新生,翟淡,等.油品燃烧火焰光谱特性模拟实验研究[J].后勤工程学院学报,2016,32(1):23-28.
- [13] 敖文,杨卫娟,汪洋,等.气流速度对晶体硼颗粒热氧化及点火燃烧特性的影响[J].固体火箭技术,2013,36(4):511-515.
- [14] 张靖周.高等传热学[M].北京:科学出版社,2009.
- [15] 欧阳的华,陈昕,潘功配,等.氧差对烟火药光辐射强度的影响[J].火工品,2012,6(3):34-36.