

文章编号: 1006-9941(2012)06-0758-04

改性单基发射药的燃速模型

张江波, 张玉成, 李强, 严文荣, 闫光虎, 刘强, 杜江媛

(西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

摘要: 为了研究以 5/7 单基发射药为基体药, 硝化甘油(NG)为浸渍剂, 聚酯为包复剂所组成的改性单基发射药的燃烧性能, 对改性单基发射药的浸渍层分布, 燃烧过程中药型尺寸及能量特性的变化进行了理论分析和实验验证。制备了 NG 浸渍量分别为 10% 和 15% 两个样品, 进行了密闭爆发器试验、显微切片照相, 用所建理论模型计算了试验结果。结果表明: NG 浸渍量为 15% 时, 火药力提高了 10.14%, 浸渍深度约 0.168 mm, 小于 150 MPa, 计算所得基体药 $u-p$ 曲线高于改性单基发射药 $u-p$ 曲线; 大于 150 MPa, 两者 $u-p$ 曲线重叠。当 NG 和聚酯在推进剂中的浸渍量分别为 15% 和 2.5% 时, 在 NG 和聚酯浸渍量配比合适的条件下, 改性单基发射药的火药力和燃烧渐增性在一定范围内可以做到同时增加。

关键词: 材料学; 改性单基发射药; 燃烧; 燃速; 物理模型; 燃烧渐增性; 密闭爆发器

中图分类号: TJ55

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2012.06.021

1 引言

随着新概念武器系统、超高速发射系统、高精度发射系统的出现, 对发射药的要求不断提高, 具有高燃烧渐增性的发射药得到了大的发展, 如程序控制发射药、多层变燃速发射药、钝感发射药、改性单基发射药、预制开裂发射药技术等。其中以硝化棉为主要组分的改性单基发射药在提高了发射药能量的基础上具有低烧蚀、低温度系数特点, 能够大幅度提高火炮炮口的动能水平, 瑞士已经研制成功并推广应用^[1-2], 西安近代化学研究所的研究也已经取得较大进展^[3-7], 改性单基发射药基础理论研究尤其是药型燃烧速度模型理论方面正在进行深入研究。本工作主要着重于改性单基发射药燃烧速度基础理论方面的研究, 分析了改性单基发射药的结构特征, 建立了相关药型的燃烧速度模型及方程, 制备了 2 种样品, 进行了密闭爆发器试验, 通过试验及计算知, 所建立的模型基本能够反映改性单基发射药的燃烧过程, 经浸渍钝感后的改性单基发射药具有较好的燃烧渐增性。

2 改性单基发射药燃烧速度模型

2.1 改性单基发射药结构特征分析

改性单基发射药采用压伸浸渍工艺进行制备, 首

先压出单孔、七孔等不同药型形状的以硝化棉为基本能量组分的均质单基发射药, 然后通过浸渍高能组分(主要是硝化甘油)使能量得到大幅度提升, 为降低初始燃速, 在表面浸渍一薄层钝感剂, 最后在表面包覆一层均匀的高性能改性材料, 完成整个制备过程。改性单基发射药的结构示意图如图 1 所示。

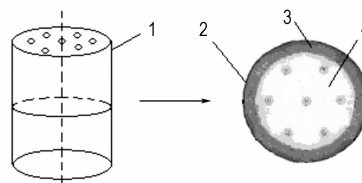


图 1 从均质单基发射药制备改性单基发射药示意图

1—均质单基发射药粒, 2—表面包覆层, 3—浸渍层, 4—均质硝化棉层

Fig. 1 Sketch map of modified single base propellant made from the homogeneous single base propellant

1—grain of homogeneous single base propellant, 2—surface overlay, 3—dipping layer, 4—homogeneous nitrocellulose layer

根据改性单基发射药的制备工艺过程及图 1 可知, 改性单基发射药具有如下的结构特征: (1) 药粒整体为非均质材料; (2) 药粒表层(指发射药外圆周面及两端面)浸渍深度较深, 小孔内部浸渍深度较浅; (3) 由物体浸渍原理知, 浸渍浓度和深度服从渐减或递减抛物线规律; (4) 通过对实验样品的药型测试知, 药粒较均质单基发射药粒(基体药粒)外形尺寸增大不明

收稿日期: 2011-09-01; 修回日期: 2012-04-25

作者简介: 张江波(1982-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事发射药及装药技术研究。e-mail: zhangjiangbo1981@163.com

显；(5) 发射药内层未浸渍部分为均质硝化棉层。

2.2 改性单基发射药燃烧速度数学物理模型

根据以上分析,提出改性单基发射药的组成及燃烧速度数学物理模型,为方便计算研究给出假设条件:(1) 改性单基发射药基体为质地严格均一的同质材料发射药;(2) 浸渍浓度的分布和浸渍深度以某一函数的形式给出,并且严格服从给出的函数,其它随机因素和工艺细节的影响不予考虑;(3) 包覆层为表面(不包含小孔内部表面)一薄层;(4) 各发射药药粒完全相同,所有计算均不考虑实际中发射药的外形偏差;(5) 发射药燃烧服从几何燃烧定律,同层发射药具有相同的燃速,非均质组成部分的不同层之间按相应的燃速公式计算;(6) 不同层不均质部分具有各自的主要物性参数,包括火药力、燃速系数、压力指数、密度、燃烧产物具有均一的物性;(7) 根据试验和经验,改性单基发射药体积的增大为一可忽略的数值,因此,假定改性单基发射药与基体发射药相比体积不变,密度随浸渍深度变化,用某一函数给出。

根据以上假定,对于一定量的 5/7 基体发射药,加入 5%~20% 硝化甘油的浸渍量,以浸渍深度 x 为自变量,则硝化甘油浓度分布为 $cJ(x)$,加入 0%~3% 聚酯的浸渍量,则聚酯浓度分布为 $cZ(x)$ 。

由物理学中密度的定义知,在任意深度 x 处有

$$\rho_g(x) = \frac{V_n \rho(x) + V_n \rho(x) cJ(x) + V_n \rho(x) cZ(x)}{V_n} = \rho(x) + \rho(x) cJ(x) + \rho(x) cZ(x) \quad (1)$$

式中, $\rho_g(x)$ 为不同深度改性单基发射药的密度, $\rho(x)$ 为基体药密度, V_n 为深度 x 处某一层的体积。

组分混合过程中没有反应且浸渍组分和钝感组分总的含量较少,火药力近似符合加和定律

$$f(x) = \frac{f_1 V_1 \rho(x) + f_1 V_1 \rho(x) cJ(x) + f_2 V_k \rho(x) cZ(x)}{V_1 \rho(x)} \quad (2)$$

式中, f_1 为基体药火药力, f_1 为浸渍材料火药力, f_2 为钝感剂火药力,某一深度均质基层的体积为 V_1 ,在体积 V_1 中浸渍含能组分后,体积变为 V_1 ,在钝感后体积变为 V_k ,根据试验中体积的增量较小,因此忽略体积的变化,则有 $V_1 = V_1 = V_k$,由于钝感剂组分含量少且为不含能的材料,对于火药力的贡献可以近似略去不计,即最后一项近似等于 0,式(2)化简后得:

$$f(x) = f_1 + f_1 cJ(x) \quad (3)$$

火药燃烧规律为

$$\Psi(x) = \chi Z(x) (1 + \lambda Z(x) + \mu Z^2(x)), x \in [0, x_b] \quad (4)$$

x_b 为浸渍深度的边界值,在燃烧深度大于 x_b 后,

为均质基体发射药的燃烧,服从一般发射药燃烧规律。

为对发射药密闭爆发器中的数据进行计算,结合以上改性单基发射药的燃烧特点,有

$$\Psi(x) = \frac{\frac{1}{\Delta} - \frac{1}{\rho_g(x)}}{\frac{f(x)}{\rho_\psi' - \rho_B} + \alpha - \frac{1}{\rho_g(x)}} \quad (5)$$

根据燃速的定义公式有

$$u(x) = e_1 \frac{dZ(x)}{dt} \quad (6)$$

将式(1)、(3)、(4)和(5)合并后得

$$\chi Z(x) (1 + \lambda Z(x) + \mu Z^2(x)) = \frac{\frac{1}{\Delta} - \frac{1}{\rho(x) + \rho(x) cJ(x) + \rho(x) cZ(x)}}{\frac{f_1 + f_1 cJ(x)}{\rho_\psi' - \rho_B} + \alpha - \frac{1}{\rho(x) + \rho(x) cJ(x) + \rho(x) cZ(x)}} \quad (7)$$

当 $x \in [x_b, e_1]$ 时,采用通用计算方法计算。 e_1 为弧厚的一半。

由式(7)知,在已知爆发器所测压力 p_ψ' 及浓度分布后,可求得 p_ψ' 与 $Z(x)$ 的关系,由式(6)可获得 $u(x)$ 与 $p(x)$ 的关系,即为改性单基发射药在密闭爆发器中的燃速关系式。由于钝感剂含量少且位于改性单基发射药表层,在压力达到一定值(如 30 MPa)后,钝感剂已经完全燃烧,故钝感剂对较高压力(如大于 30 MPa)下的燃速无影响,以下结合具体实例说明。

3 实验部分

3.1 样品及制备

制备了两种样品,基体药采用 5/7 单基发射药,采用浸渍-驱水-浸渍-驱水工艺路线。(1) 在基体药中加入 10% NG 组分进行浸渍,经工艺处理后再加入 2.5% 聚酯组分进行浸渍,得到 Z0604-1 号改性单基发射药;(2) 在基体药中加入 15% NG,经工艺处理后加入 2.5% 聚酯,制得 Z0604-2 号改性单基发射药。

3.2 密闭爆发器试验

对制备的改性单基发射药进行密闭爆发器试验,密闭爆发器容积为 100 mL,装填密度为 $0.2 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$,点火药包采用 1.1 g 硝化棉,正常点火压力为 10 MPa,在此条件下对 Z0604-1 号和 Z0604-2 号改性单基发射药,以及基体药分别进行了燃烧性能测试。

4 结果及讨论

4.1 样品及其性能参数

对制备的发射药进行了火药力、爆热、药型系数的

测定,并进行了显微切片照相,基本性能参数见表1。由表1可知,浸渍过NG后的Z0604-1发射药爆热由基体药的 $3798 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增加到 $3894 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$,增幅2.53%,火药力由 $986 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增加到 $1056 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$,增幅7.1%;Z0604-2发射药爆热由基体药的 $3798 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增加到 $4076 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$,增幅7.32%,火药力由 $986 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增加到 $1086 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$,增幅10.14%。这表明采用NG浸渍,发射药能量提高幅度较大,工艺方法成熟,增能效果较好。由表1中药型尺寸数据可知,发射药的弧厚、内径、外径基本没有变化,这也证明了上述假定条件(7)及公式(1)的合理性。图2和图3为Z0604-2发射药显微横切照片和显微剖切照片。

从图2中看出,NG浸渍层外表面浸渍深度较深,小孔处有一定的浸渍且较均匀,浸渍比例没有外层浸渍深度大。由图3可知,浸渍层在外围分布均匀,细孔中分布不太均匀,两端浸渍深度要高于中间浸渍深度。总体看来,浸渍深度大约为基体药半径的 $1/3$,由几何学计算得浸渍总体积占基体药的56%,即浓度分布函数 $c_j(x)$ 中 x 的边界条件 x_b 为 $0.3 \times 0.56 = 0.168 \text{ mm}$ 。公式(7)中采用抛物线形式(由文献[8]知,浸渍浓度服从抛物线分布)。

4.2 密闭爆发器试验结果

对制备的改性单基发射药和基体发射药进行了密闭爆发器试验,采用所建立的燃速理论公式及以上得到的边界条件值 x_b 对试验曲线进行了计算,图4为试验所测得的三种发射药 $p-t$ 曲线。

表1 样品基本性能参数

Table 1 Basic parameters of samples

sample	e_1 /mm	d_0 /mm	D /mm	ω_{NG} /%	f / $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	Q_v / $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
SB propellant	0.30	0.15	3.01	0	986	3798
Z0604-1	0.31	0.16	3.03	10	1056	3894
Z0604-2	0.30	0.15	3.04	15	1086	4076

Note: e_1 , half web of grain; d_0 , inner diameter of grain; D , outer diameter of grain; ω %, percentage content of NG; f , the energy of propellant; Q_v , explosion heat of constant volume.

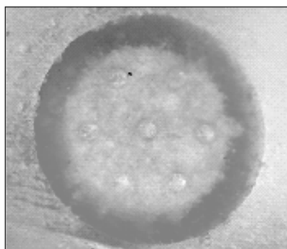


图2 Z0604-2发射药显微横切照片

Fig. 2 Transverse metallographic of Z0604-2 propellant

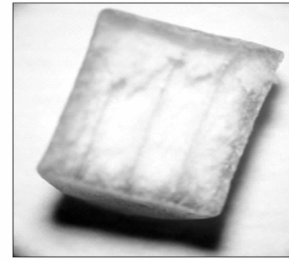


图3 Z0604-2发射药显微剖切照片

Fig. 3 Longitudinal metallographic of Z0604-2 propellant

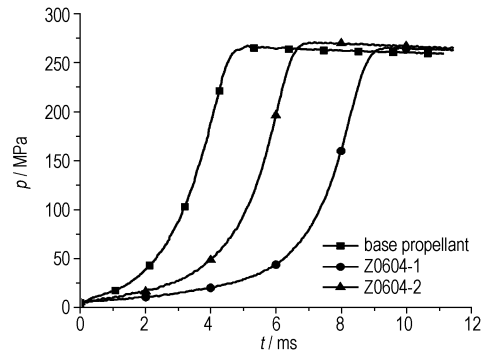


图4 三种发射药 $p-t$ 曲线

Fig. 4 $p-t$ curves of three gun propellants

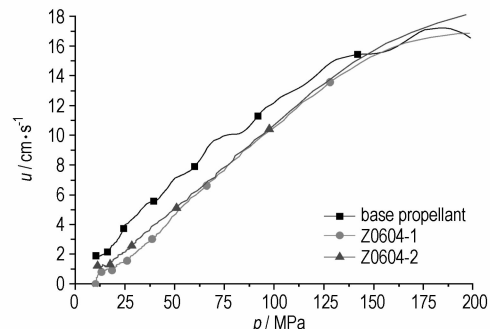


图5 理论计算得到的 $u-p$ 曲线

Fig. 5 Calculated $u-p$ curves based on $p-t$ curves

由图4知,Z0604-2发射药的 $p-t$ 曲线最大压力为270 MPa,基体药和Z0604-1发射药的 $p-t$ 曲线最大压力相当(均为265 MPa),因此,基体药经增能钝感后,能量有了一定幅度的提高。由图4可见,Z0604-2起始燃烧及上升明显快于Z0604-1,这可能是由于钝感剂含量均为2.5%,而Z0604-2NG浸渍量较高所致。

采用燃速理论公式(6)、(7)对改性单基发射药Z0604-1、Z0604-2的 $p-t$ 曲线进行了处理,得到了 $u-p$ 曲线,如图5所示。由图5可见,小于150 MPa,Z0604-1、Z0604-2的 $u-p$ 曲线低于基体药的 $u-p$ 曲线,三条曲线在150 MPa附近重合。这说明,改性单基发射药在能量有了较大幅度提高的情况下(Z0604-2的火

药力为 $1086 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 大于基体药的 $986 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$), 燃速变化规律为在低压下较慢(小于 150 MPa, 改性单基发射药 $u-p$ 曲线低于基体药的 $u-p$ 曲线), 高压下与基体药相当(大于 150 MPa, 三条 $u-p$ 曲线基本重合), 较好地实现了发射药的燃烧渐增性。

5 结 论

(1) 针对改性单基发射药的结构组成, 提出了改性单基发射药燃烧速度模型, 在不考虑钝感剂能量影响的情况下, 能够给出改性单基发射药的燃速计算公式。

(2) 改性单基发射药的燃速变化规律为在低压下(小于 150 MPa) 较慢, 高压下(大于 150 MPa) 与基体药相当, 较好地实现了发射药的燃烧渐增性。

(3) 在 NG 浸渍量和聚酯浸渍量比例合适的条件下(NG15%, 聚酯 2.5%), 改性单基发射药的火药力由基体药的 $986 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 提高到 $1086 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$, 燃速曲线较基体药的低, 能够实现在增大火药力的同时降低起始阶段的燃速。

参考文献:

- [1] Beat Vogelsanger, Kurt Ryf. El-technology—The key for high performance propulsion design[C]//29th International Annual Conference of ICT, Karlsruhe, 1998.
- [2] 王琼林, 李上文, 王泽山. 高分子钝感剂在发射药中的扩散性能研究[J]. 火炸药学报, 2000, 23(1): 14-16.
WANG Qiong-lin, LI Shang-wen, WANG Ze-shan. Research development for diffusion of deterrent in gun propellant[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants* (Huozhayao Xuebao), 2000, 23(1): 14-16.
- [3] 梁勇, 王琼林, 于慧芳, 等. 增能钝感单基药的燃烧特性[J]. 含能材料, 2007, 15(6): 597-599.
LIANG Yong, WANG Qiong-lin, YU Hui-fang, et al. Combustion properties of the energy-increased desensitized single-base propellant[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials* (Hanneng Cailiao), 2007, 15(6): 597-599.
- [4] 刘波, 王琼林, 刘少武, 等. 提高改性单基药燃烧性能的研究[J]. 火炸药学报, 2010, 33(4): 82-84.
LIU Bo, WANG Qiong-lin, LIU Shao-wu, et al. Study on improvement of combustion performance of the modified single base propellant[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants* (Huozhayao Xuebao), 2010, 33(4): 82-84.
- [5] 熊立斌, 应三九, 罗付生. 高效液相色谱法测定单基球扁药中钝感剂的含量[J]. 火炸药学报, 2001, 24(2): 54-55.
XIONG Li-bin, YING San-jiu, LUO Fu-sheng. Determination of the deterrents in the single-base oblate spherical powder by high-performance liquid chromatography[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants* (Huozhayao Xuebao), 2001, 24(2): 54-55.
- [6] 王琼林, 刘少武, 潘清, 等. 小尺寸枪药表面高分子钝感剂浓度分布测试研究[J]. 火炸药学报, 2000, 23(3): 13-15.
WANG Qiong-lin, LIU Shao-wu, PAN Qing, et al. Study on determination of polymer deterrent concentration profile in small-sized gun propellant[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants* (Huozhayao Xuebao), 2000, 23(3): 13-15.
- [7] 张江波, 张玉成, 蒋树君, 等. 多层发射药内弹道模型及数值求解[J]. 火炸药学报, 2009, 32(3): 83-85.
ZHANG Jiang-bo, ZHANG Yu-cheng, JIANG Shu-ju, et al. The interior ballistic model and numerical simulation of multilayer charge[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants* (Huozhayao Xuebao), 2009, 32(3): 83-85.
- [8] 潘清, 王琼林, 王明, 等. 显微红外光谱法测定改性单基发射药中功能组分的浓度分布[J]. 火炸药学报, 2009, 32(3): 79-82.
PAN Qing, WANG Qiong-lin, WANG Ming, et al. Determination of the concentration profile of functional components in modified single base propellant by FTIR microspectroscopy[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants* (Huozhayao Xuebao), 2009, 32(3): 79-82.

Burning Rate Model of Modified Single Base Propellant

ZHANG Jiang-bo, ZHANG Yu-cheng, LI Qiang, YAN Wen-rong, YAN Guang-hu, LIU Qiang, DU Jiang-yuan

(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: In order to study combustion performance of the modified single base propellant composed of 5/7 single base propellant as base, NG as dipping reagent and polyester as coat reagent, a theoretical analysis and an experimental validation for the dipping layer distribution in grain, the changes of grain size and energetic characteristic in combustion process have been studied. Two samples with 10% and 15% NG dipping quantity were prepared. Closed bomb test and micrograph observation of grain slices were done, and a calculation for the experimental results was carried out with the found model. Results show that the impetus of the sample containing 15% NG dipping reagent increases by 10.14%, and dipping depth is about 0.168 mm. The $u-p$ curves of the single base propellant obtained by calculation is higher than that of the modified single base propellant before 150 MPa, and the $u-p$ curves of both overlap with each other after 150 MPa. As long as the dipping reagent ratio of NG to polyester is appropriate, both impetus and progressive burning performance of the modified can get increasing within a certain range. Both impetus and progressive burning performance of the modified single base propellant can be increased within a certain range.

Key words: materials sciences; modified single base propellant; combustion; burning rate; physical model; progressive combustion performance; closed bomb

CLC number: TJ55

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2012.06.021