

## EI 发射药的燃烧特性

郭建忠<sup>1,2</sup>, 刘少武<sup>3</sup>, 张 研<sup>1</sup>

(1. 西北工业大学燃烧流动和热结构国家重点实验室, 陕西 西安 710069; 2. 海军装备部驻西安地区军事代表局, 陕西 西安 710054; 3. 西安近代化学研究所, 陕西 西安 710065)

**摘要:**为研究 EI 发射药的燃烧性能, 基于 EI 发射药的制备过程及药形结构特征, 对 EI 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。建立了 EI 发射药的燃速计算数学模型。制备了 NG 浸渍量分别为 10% 和 15% 的 EI-1 和 EI-2 样品。进行了密闭爆发器试验、显微切片照相。结果表明, NG 浸渍量为 15% 时, 火药力提高了 10.14%, 浸渍深度为 0.168 mm; 根据实验数据计算 EI 发射药的  $u-p$  曲线, 150 MPa 前 EI 发射药的燃速高于单基发射药, 在 150 MPa 后两者重合; 由  $L-B$  曲线知 EI-2 发射药的燃烧渐增性较好。只要 NG 浸渍量和聚酯浸渍量配比合适, EI 发射药的火药力和燃烧渐增性在一定范围内可以同步增加。

**关键词:**物理化学; 燃烧; EI 发射药; 燃烧渐增性; 密闭爆发器; 火药力

中图分类号: TJ55

文献标志码: A

文章编号: 1007-7812(2012)05-0087-04

### Research on the Combustion Characteristics of EI Gun Propellant

GUO Jian-zhong<sup>1,2</sup>, LIU Shao-wu<sup>3</sup>, ZHANG Yan<sup>1</sup>

(1. National Key Laboratory of Combustion Flow and Thermo-Structure, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710069, China; 2. Xi'an Area Military Representative Bureau of Equipment Department of Navy, Xi'an 710054, China; 3. Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** In order to study the combustion performance of EI gun propellant, according to its preparation process and structure feature, a theoretical analysis and an experimental validation were performed for the dipping layer distribution in grain and the changes of grain size and energetic characteristic in combustion process. A mathematic model of calculating the burning rate of EI gun propellant was established. The samples EI-1 and EI-2 containing 10% and 15% of NG dipping reagent were prepared respectively. Closed bomb test and micrograph observation of grain slices were performed. Results show that for the sample containing 15% of NG dipping reagent, its impetus increases by 10.14%, and dipping depth is about 0.168 mm. According to the  $u-p$  curves by calculating, the burning rate of EI gun propellant is higher than that of single base propellant before 150 MPa, and these curves overlap with each other after 150 MPa and progressive burning performance of EI-2 is better. As long as the dipping reagent ratio of NG to polyester is appropriate, both impetus and progressive burning performance of the modified propellant can get increasing in a certain range.

**Key words:** physical chemistry; burning; EI propellant; progressive combustion performance; closed bomb; impetus

## 引言

发射药作为武器系统的动力能源, 决定着弹丸的初速、有效射程和发射稳定性等弹道特性, 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, 对发射药的要求也在不断提高, 具有高燃烧渐增性的发射药得到了发展, 如钝感发射药、程序控制发射药、多层变燃速发射药、改性单基发

射药(EI 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 EI 发射药, 具有低烧蚀、低温度系数、高初速特点, 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已推广应用<sup>[1-2]</sup>, 王琼林等在燃烧机理方面研究已取得较大进展<sup>[3-7]</sup>。

本研究通过对 EI 发射药的结构特征分析, 建立了相关药型燃烧的数学模型, 对制备的两种样品进行了密闭爆发器试验。

收稿日期: 2012-07-09; 修回日期: 2012-08-20

作者简介: 郭建忠(1979-), 男, 硕士研究生, 研究方向为固体火箭技术。

## 1 EI 发射药燃烧模型的建立

### 1.1 EI 发射药的结构特征

EI 发射药采用压伸浸渍工艺制备,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。

EI 发射药具有如下结构特征:(1)药粒整体为非均质发射药;(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)浸渍浓度和深度服从一定的规律;(4)药粒的外型尺寸比均质单基发射药粒(基体药粒)增大;(5)发射药内层未浸渍部分为均质硝化棉层。

### 1.2 EI 发射药燃烧数学模型的建立

为方便计算,作以下假设:(1)EI 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,其他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;(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,且燃烧产物具有均一的物性;(7)根据试验和经验,EI 发射药体积的增大为可忽略的数值,因此,假定 EI 发射药与空白发射药相比体积不变,密度随浸渍参数变化,用某一函数给出(一般为抛物线形式<sup>[3]</sup>)。

根据以上假定,对于一定量的 5/7 空白发射药,加入质量分数 5%~20%硝化甘油的浸渍量,以浸渍深度  $x$  为自变量,则浓度分布  $cJ(x) = fJ(x)$ ,加入 0~3%聚酯的浸渍量,则浓度分布  $cz(x) = fz(x)$ 。

由物理学中密度的定义知,在任意深度  $x$  处有:

$$\rho(x) = \frac{V_n p(x) + V_n \rho(x) cJ(x) + V_n \rho(x) cz(x)}{V_n} = \rho(x) + \rho(x) cJ(x) + \rho(x) cz(x) \quad (1)$$

组分混合过程中没有反应且火药力符合加和定律有:

$$f(x) = \frac{f_1 V_1 \rho(x) + f_j V_n \rho(x) cJ(x) + f_z V_k \rho(x) cz(x)}{V_1 \rho(x)} \quad (2)$$

其中假定在某一均质基层的体积为  $V_1$ ,在体积  $V_1$  中浸渍含能组分后,因试验中体积的增量较小,因此忽略体积的变化,则有  $V_1 = V_n = V_k$ ,由于钝感

剂组分含量少且为不含能的材料,可以略去不计,即最后一项近似等于 0,化简后得:

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

火药燃烧规律为:

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

$x_b$  为浸渍深度的边界值,在燃烧深度大于  $x_b$  后,为均质空白发射药的燃烧,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 EI 发射药的燃烧特点,有

$$\varphi(x) = \frac{\frac{1}{\Delta} - \frac{1}{\rho(x)}}{\frac{f(x)}{\rho_\varphi^f - \rho_s} + \alpha - \frac{1}{\rho(x)}} \quad (5)$$

根据燃速的定义公式有

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

公式(5)为 EI 发射药在密闭爆发器中的燃速关系式。

## 2 实 验

### 2.1 样品的制备

空白发射药为 5/7 单基发射药,采用浸渍-钝感-烘干-光泽的工艺处理:(1)在基体药中浸入质量分数 10%的 NG,经工艺处理后再加入质量分数 2.5%的聚酯进行钝感,得到 EI-1 发射药;(2)在基体药中加入质量分数 15%NG,经工艺处理后加入质量分数 2.5%的聚酯进行钝感,制得 EI-2 发射药。

### 2.2 密闭爆发器试验

密闭爆发器容积为 100 mL,装填密度为 0.2 g/mL,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 EI-1、EI-2 发射药及基体单基发射药分别进行密闭爆发器试验。

## 3 结果及讨论

### 3.1 浸渍量与浸渍深度的关系

发射药的火药力、爆热、药型系数测试结果见表 1。

表 1 样品基本性能测试结果

样品代号	$e_1$ /mm	$d_0$ /mm	$D$ /mm	$w$ /%	$f$ / (kJ · kg <sup>-1</sup> )	$Q_v$ / (kJ · kg <sup>-1</sup> )
5/7 单基药	0.30	0.15	3.01	0	986	3798
EI-1	0.31	0.16	3.03	10	1056	3894
EI-2	0.30	0.15	3.04	15	1086	4076

注: $e_1$  为弧厚的一半; $d_0$  为内径; $D$  为外径; $w$  为 NG 质量分数; $f$  为火药力; $Q_v$  为定容爆热

从表 1 可知, 经过浸渍的 EI-1 发射药, 爆热由基体药的 3798 kJ/kg 增加到 3894 kJ/kg, 增幅 2.53%, 火药力由 986 kJ/kg 增加到 1056 kJ/kg, 增幅 7.1%; EI-2 发射药爆热由基体药的 3798 kJ/kg 增加到 4076 kJ/kg, 增幅 7.32%, 火药力由 986 kJ/kg 增加到 1086 kJ/kg, 增幅 10.14%。表明采用 NG 浸渍后, 发射药能量提高幅度较大, 浸渍量为 15% 时, 火药力提高了 10.14%, 工艺方法成熟, 增能效果较好。由表 1 数据可知, 发射药体积基本没有变化, 述假定条件(7)较合理。对 EI-2 发射药进行显微切片照相, EI-2 发射药显微横切照片和显微剖切照片见图 1(a) 和图 1(b)。

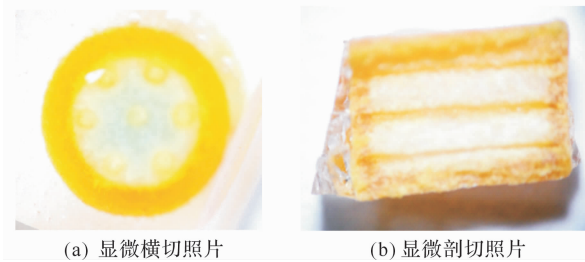


图 1 EI-2 发射药显微照片

Fig. 1 Transverse and longitudinal micrographs of EI-2 propellant

从图 1(a) 可看出, NG 浸渍层外表面的浸渍深度较深, 小孔处有一定的浸渍且较均匀, 浸渍深度没有外层浸渍深度大。由图 1(b) 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。EI 发射药的实际组成与模型中的假设基本相符。

### 3.2 浸渍与燃烧渐增性的关系

对 EI 发射药和空白发射药进行了密闭爆发器试验, 采用公式(5)及得到的边界条件值对试验曲线进行了计算, 图 2(a) 为 3 种发射药的  $p-t$  曲线, 图 2(b) 为根据实验数据计算得到的  $u-p$  曲线, 图 2(c) 为 3 种发射药的  $L-B$  曲线。

由图 2(b) 和 2(c) 可知, 基体药经增能钝感后, 能量较基体药有了一定幅度的提高, EI-2 发射药的最大压力最高, 基体药和 EI-1 发射药的最大压力相当, 图 2(a) 中 EI-2 的曲线起始燃烧及上升明显快于 EI-1, 这可能是由于钝感剂的质量分数均为 2.5%, 而 NG 浸渍量不同所致。当 NG 浸渍量较大时, 钝感剂所起的作用并不是呈线性值, 因此导致 EI-2 发射药燃烧较快, 由于钝感剂对燃烧影响的复杂性以及含量少, 计算部分未考虑钝感剂能量的影响。用公式(5)对 EI 发射药的燃速曲线进行求解, 结果如图 2(b) 所示, 基体药的燃速高于 EI 发射药, EI-2 发

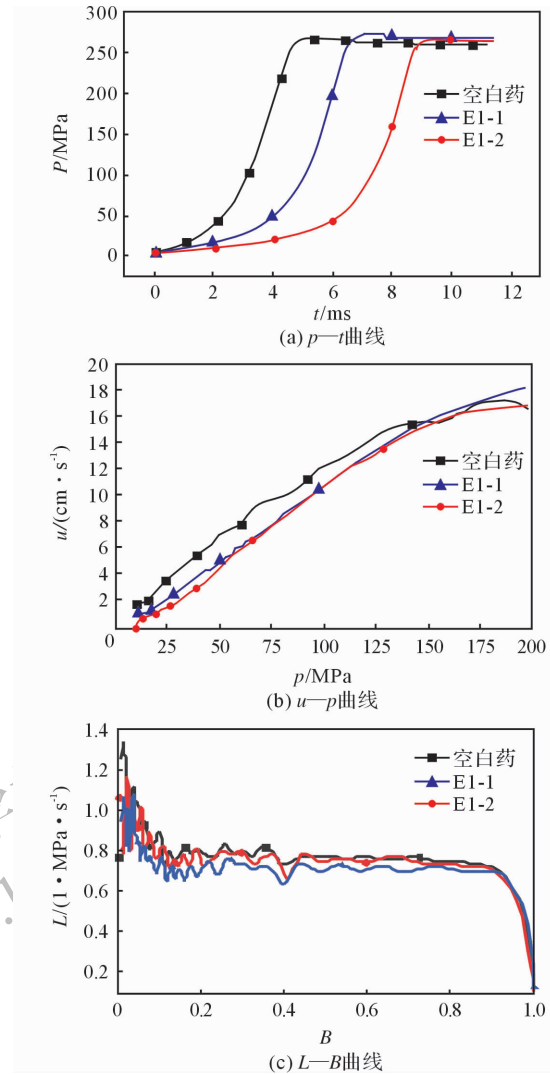


图 2 三种发射药  $p-t$  曲线

Fig. 2  $p-t$  curves of three gun propellants

射药较 EI-1 发射药的燃速略高, 燃烧渐增性能较好, 在 60 MPa 以后比较接近, 说明未考虑钝感剂能量影响的数学模型在一定程度上与试验结果吻合, 基本上能够描述 EI 发射药的燃烧过程。由图 2(b) 可知, 三条曲线在 150 MPa 附近重合, 说明在能量较大幅度提高的条件下, EI 发射药的燃速变化在低压下较慢, 高压下较快。图 2(c) 的  $L-B$  曲线中, EI-2 的前半部分较 EI-1 和基体药的曲线低, 而后半部分基本平行, 说明 EI-2 发射药的燃烧渐增性较好。

## 4 结 论

(1) 基于 EI 发射药的结构组成, 提出了药型燃烧过程的理论模型, 并经试验验证, 所建立的理论模型在不考虑钝感剂能量性能影响的情况下, 基本上能够反应 EI 发射药的燃烧特性。

(2)EI 发射药在实现高能量的同时,燃速在低压力下较小,高压下较大,实现了在药型不变的情况下,具有较强的燃烧渐增性。

(3)在 NG 浸渍量和聚酯浸渍量配比合适的条件下,EI 发射药的火药力和燃烧渐增性可以做到同步增加。

#### 参考文献:

- [1] Vogelsanger B, Ryf K. EI-technology-the key for high performance propulsion design[C]//29th International Annual Conference of ICT. Karlsruhe: ICT, 1998.
- [2] 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 and Propellants, 2000, 23(3):13-15.
- [3] 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 the concentration profile of functional components in modified single base propellant by FTIR microspectroscopy[J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2009, 32(3):79-82.

- [4] 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 and Propellants, 2000, 23(1):14-16.
- [5] 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, 2007, 15(6):597-599.
- [6] 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 and Propellants, 2010, 33(4):82-84.
- [7] 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 and Propellants, 2001, 24(2):54-55.

(上接第 73 页)

- SHAN Wen-gang, QIN Guang-ming, LEI Liang-fang, et al. Effects of resonance burning inhibitors on combustion characteristics of cast RDX-CMDB propellant [J]. Journal of Solid Rocket Technology, 1997, 20(2): 53-56.
- [5] 张晓宏,张蕊娥,王百成,等. 利用燃烧稳定剂调节燃速的研究[J]. 火炸药学报,2000,23(3):28-29.  
ZHANG Xiao-hong, ZHANG Rui-e, WANG Bai-cheng, et al. Study on burning rate regulating by combustion stabilizer [J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2000, 23(3):28-29.
- [6] 张晓宏,张佩,刘小刚,等. 新型燃烧稳定剂对浇铸 RDX-CMDB 推进剂燃烧性能的影响[J]. 火炸药学报,2010,33(6):87-90.

- ZHANG Xiao-hong, ZHANG Pei, LIU Xiao-gang, et al. Effect of new combustion stabilizers on the combustion performance of RDX-CMDB propellant [J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2010, 33(6):87-90.
- [7] 刘源,钟炳,彭少逸,等. 超细二氧化锆的制备和表征[J]. 物理化学学报,1995,11(9):781-784.  
LIU Yuan, ZHONG Bing, PENG Shao-yi, et al. The preparation and characterization of ultrafine ZrO<sub>2</sub> [J]. Acta Phys Chem, 1995, 11(9):781-784.
- [8] Santos J B O, Valenca G P, Rodrigues J A J. Catalytic decomposition of hydrazine on tungsten carbide: The influence of adsorbed oxygen[J]. Journal of Catalysis, 2002(210): 1-6.