

文章编号: 1006-9941(2011)01-0069-05

药型对层状发射药燃烧渐增性的影响

鲁坤, 马忠亮, 萧忠良

(中北大学化工与环境学院, 山西 太原 030051)

摘要: 为了研究层状发射药的燃烧渐增性能, 建立了该类药型相应的形状函数, 对影响层状发射药燃烧渐增性能的四个主要因素(即缓燃层厚度比例 x_1 、燃速比 k 、药片厚宽比 β 及黑索今 RDX 含量)取值相同的情况下, 根据药型和形状函数分别进行了计算和分析, 得到了相对已燃质量 ψ 、相对表面积 σ 随相对已燃厚度 z 的变化曲线。结果表明: 与多层片状层状发射药(方片片状层状发射药和圆饼片状层状发射药)相比, 多层管状层状发射药的燃烧渐增性较好。

关键词: 应用化学; 层状发射药; 药型; 燃烧性能; 形状函数

中图分类号: TJ55; O69

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.01.016

1 引言

如果想获得较高的火炮膛口初动能, 目前通常采用的途径有增加发射药装药的总能量或是提高发射药能量利用率和示压效率。而提高发射药示压效率主要采用燃速和燃面渐增性发射药装药技术, 或者是两者结合。萧忠良教授等采用高能发射药和包覆技术研究双层变燃速固体发射药, 在研究过程中, 选取管状药, 并取得了显著的成果^[1-4]。而大于两层的变燃速固体发射药, 即层状发射药, 一般通过包覆、挤压、程序控制等发射药技术实现, 并在研究过程中药型一般选择为片状^[5-9]。而关于药型对层状发射药燃烧渐增性的影响, 国内外尚未见报道。本研究基于前人工作的基础, 分别针对多层管状层状发射药、方片片状层状发射药和圆饼片状层状发射药, 建立相应的形状函数, 在相同的缓燃层厚度比例、燃速比、药片厚宽比及黑索今含量条件下, 考察药型对层状发射药燃烧性能的影响, 为层状发射药的设计和研制提供理论基础。

2 层状发射药的形状函数

2.1 层状发射药形状函数的假设前提

为简化计算过程, 可假设如下:

(1) 外层药(即缓燃层)与内层药(即速燃层)的

燃速分别为 $u_{\text{缓}} = u_1 \rho$ 和 $u_{\text{速}} = u_2 \rho$, 式中 u_1 、 u_2 分别为缓燃、速燃层的燃速系数。且令速燃、缓燃层的燃速系数之比为 k , 即 $k = u_2 / u_1$, 且 $k > 1$;

(2) 层状发射药内、外层药及端面都严格按照几何燃烧定律进行燃烧;

(3) 发射药不同层燃烧生成的气体互不发生反应。缓燃层密度 ρ_h 和速燃层密度 ρ_1 相同, 即 $\rho_h = \rho_1$;

(4) 发射药缓燃层燃完前, 忽略端面或侧面燃烧对燃面的影响;

(5) 不考虑层状发射药缓燃层与速燃层边界的影响, 假定外层燃完, 内层就开始燃烧;

(6) 层状发射药厚宽比足够小, 即: 不考虑侧面燃尽时而缓燃层未燃完的情况;

(7) 多层管状发射药长度为 l , 外面缓燃层内外径分别为 D_h 和 D_0 ; 里面缓燃层内外径分别为 d_0 和 d_h ; 中间速燃层内外径分别为 d_h 和 D_h 。方片状层状发射药宽度为 l , 速燃层厚度为 D_h , 总厚度为 D_0 。圆饼片状层状发射药内外径分别为 d_0 和 D_0 , 速燃层厚度为 D_h , 总厚度为 l 。两侧缓燃层厚度相等。如图 1~图 3 所示。

(8) 设缓燃层厚度占层状药总厚度的比例为 x_1 。其中多层管状药 $x_1 = \frac{D_0 - D_h}{D_0 - d_0}$; 方片状层状发射药

$x_1 = \frac{D_0 - D_h}{D_0}$; 圆饼片状层状发射药 $x_1 = \frac{l - D_h}{l}$ 。

(9) 设层状药燃烧到某一时刻时已燃厚度与初始厚度之比为 z ;

收稿日期: 2010-06-28; 修回日期: 2010-09-07

作者简介: 鲁坤(1984-), 男, 从事发射药燃烧性能研究。

e-mail: Nanhe520@126.com

(10) 设层状药厚度与宽度之比为 β 。其中多层管状药 $\beta = \frac{D_0 - d_0}{I}$; 方片状层状发射药 $\beta = \frac{D_0}{I}$; 圆饼

片状层状发射药 $\beta = \frac{D_0 - d_0}{I}$

2.2 发射药相对表面积 σ

$$\text{因 } \frac{d\psi}{dt} = \frac{s_1}{\Lambda_1} \frac{s}{s_1} u \quad (1)$$

式中, $\frac{s_1}{\Lambda_1}$ 为药粒单位体积所具有的表面积; $\frac{s}{s_1}$ 为药粒燃烧过程中瞬间面积与原始面积之比; u 为燃烧线速度。

$$\text{又由于 } \frac{d\psi}{dz} = \frac{d\psi}{dt} \frac{dt}{de} \frac{de}{dz} \quad (2)$$

2.3 多层管状发射药的形状函数

设多层管状发射药的初始模型如图 1 所示。

由经典内弹道学可知, 药燃烧质量分数 $\psi = \frac{m(\text{已燃药片})}{m(\text{初始药片})}$, 而已燃药片 m 包括内、外层药及端面的燃烧。

当 $D \geq D_h$ (即 $z \leq x_1$) 时, 发射药燃烧质量分数 ψ 为:

$$\psi = \frac{I[\rho_1(D_0^2 - D^2) + \rho_1(d^2 - d_0^2)] + k(d - d_0)\rho_h(D_h^2 - d_h^2)}{I[\rho_1(D_0^2 - D_h^2) + \rho_h(D_h^2 - d_h^2) + \rho_1(d_h^2 - d_0^2)]} \quad (7)$$

$$\psi(D \geq D_h) = z - zk\beta(x_1 - 0.5) \quad (7)$$

$$\sigma(D \geq D_h) = 1 \quad (8)$$

当 $D < D_h$ (即 $z > x_1$) 时, 药燃烧质量分数 ψ 为:

$$\psi = \psi(D = D_h) + \frac{[I - k(D_0 - D_h)][\rho_h(D_h^2 - D^2) + \rho_h(d^2 - d_h^2)] + (D_h - D)\rho_h(D^2 - d^2)}{I[\rho_1(D_0^2 - D_h^2) + \rho_h(D_h^2 - d_h^2) + \rho_1(d_h^2 - d_0^2)]} \quad (9)$$

$$\psi(D < D_h) = kx_1\beta(1 - z) + z + \beta(0.5z - x_1)(1 - z) \quad (9)$$

$$\sigma(D < D_h) = \frac{1 + \beta x_1 - \beta z - kx_1\beta + 0.5\beta}{(1 + 0.5\beta) + (1 - k)\beta x_1} \quad (10)$$

式中, D 和 d 分别为多层管状药燃烧到某一时刻时的外径和内径。

2.4 方片状层状发射药的形状函数

设方片状层状发射药的初始模型如图 2 所示。

当 $D \geq D_h$ (即 $z \leq x_1$) 时, 药燃烧质量分数 ψ 为:

$$\psi = \frac{\rho_1 I^2 (D_0 - D) + \frac{u_h}{u_1} (D_0 - D) I \rho_h D_h}{\rho_1 I^2 (D_0 - D_h) + \rho_h I^2 D_h} \quad (11)$$

$$\psi(D \geq D_h) = z - kz\beta(x_1 - 1) \quad (11)$$

$$\sigma(D \geq D_h) = 1 \quad (12)$$

当 $D < D_h$ (即 $z > x_1$) 时, 药燃烧质量分数 ψ 为:

$$\psi(D < D_h) = \frac{\rho_1 I^2 (D_0 - D_h) + \frac{u_h}{u_1} (D_0 - D_h) I \rho_h D_h + \rho_h [I - \frac{u_h}{u_1} (D_0 - D_h)] I (D_h - D) + \rho_h I (D_h - D) D}{\rho_1 I^2 (D_0 - D_h) + \rho_h I^2 D_h} \quad (13)$$

$$\psi(D < D_h) = z + k\beta x_1(1 - z) + (z - x_1)\beta(1 - z) \quad (13)$$

$$\frac{dt}{de} = \frac{1}{u}, \quad \frac{de}{dz} = e_1 \quad (3)$$

式中, e_1 为发射药弧厚。

$$\text{则 } \frac{d\psi}{dz} = \frac{s_1}{\Lambda_1} \frac{s}{s_1} u \frac{e_1}{u} = \frac{s_1}{\Lambda_1} \frac{s}{s_1} e_1 \quad (4)$$

由于在燃烧过程开始时 $z = 0, s = s_1$,

$$\text{则 } \left. \frac{d\psi}{dz} \right|_{z=0} = \frac{s_1}{\Lambda_1} e_1 \quad (5)$$

$$\text{故 } \sigma = \frac{s}{s_1} = \frac{\frac{d\psi}{dz}}{\left. \frac{d\psi}{dz} \right|_{z=0}} \quad (6)$$

$$\sigma(D < D_h) = \frac{(1 + \beta) - 2z\beta + (1 - k)\beta x_1}{(1 + \beta) + (1 - k)\beta x_1} \quad (14)$$

式中, D 为方片状层状发射药燃烧到某一时刻的厚度。

2.5 圆饼片状层状发射药的形状函数

设圆饼片状层状发射药的初始模型如图 3 所示。

当 $D \geq D_h$ (即 $z \leq x_1$) 时, 药燃烧质量分数 ψ 为:

$$\psi = \frac{(I - D)(D_0^2 - d_0^2)\rho_1 + [(D_0^2 - (D_0 - \frac{k(I - D)}{2})^2) + ((\frac{k(I - D)}{2} + d_0)^2 - d_0^2)]\rho_h D_h}{(I - D_h)(D_0^2 - d_0^2)\rho_1 + (D_0^2 - d_0^2)\rho_h D_h} \quad (15)$$

$$\psi(D \geq D_h) = z - kz\beta(x_1 - 1) \quad (15)$$

$$\sigma(D \geq D_h) = 1 \quad (16)$$

当 $D < D_h$ (即 $z > x_1$) 时, 药燃烧质量分数 ψ 为:

$$\begin{aligned} \psi = & \psi(D = D_h) + \\ & \frac{(D_h - D)[((D_0 - \frac{k(I - D_h)}{2})^2 - (\frac{k(I - D_h)}{2} + d_0)^2) + ((D_0 - \frac{k(I - D_h)}{2})^2 - (D_0 - \frac{k(I - D_h)}{2} - \frac{D_h - D}{2})^2)]\rho_h}{(I - D_h)(D_0^2 - d_0^2)\rho_1 + (D_0^2 - d_0^2)\rho_h D_h} \\ & + \frac{[(\frac{k(I - D_h)}{2} + d_0 + \frac{D_h - D}{2})^2 - (\frac{k(I - D_h)}{2} + d_0)^2]\rho_h D}{(I - D_h)(D_0^2 - d_0^2)\rho_1 + (D_0^2 - d_0^2)\rho_h D_h} \end{aligned} \quad (17)$$

$$\psi(D < D_h) = z + k\beta x_1(1 - z) + (z - x_1)\beta(1 - z) \quad (17)$$

$$\sigma(D < D_h) = \frac{(1 + \beta) - 2z\beta + (1 - k)\beta x_1}{(1 + \beta) + (1 - k)\beta x_1} \quad (18)$$

式中, D 为圆饼片状层状发射药燃烧到某一时刻的厚度。

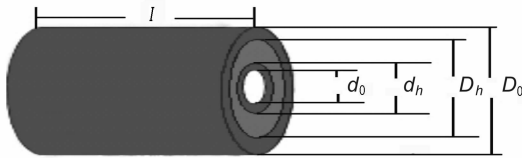


图 1 多层管状发射药结构示意图
Fig. 1 Schematic diagram of layered tubular propellant

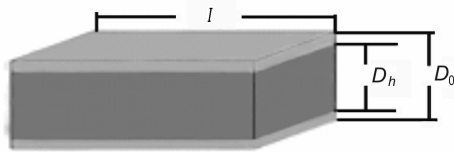


图 2 方片层状发射药结构示意图
Fig. 2 Schematic diagram of layered square sheet propellant

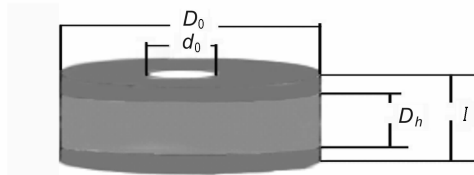


图 3 圆饼片状层状发射药结构示意图
Fig. 3 Schematic diagram of layered disc sheet propellant

3 实验部分

为了对层状发射药燃烧性能进行研究, 制备了方片层状发射药, 并进行了密闭爆发器试验。

3.1 试样制备

方片层状发射药由内层和外层组成(如图 2 所示)。内层为速燃层, 外层为缓燃层。采用以单基药为基础配方, 在内层中添加细化的黑索今(含量为 30%), 外层添加高分子阻燃剂 EC(含量为 10%), 缓燃层厚度占总厚度比例为 0.4, 厚宽比为 0.3。采用塑化-压延-涂敷制备工艺, 实验中把外层配制成溶液涂覆在内层表面。

3.2 密闭爆发器试验

密闭爆发器容积 106 mL; 装填密度 $0.2 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$; 点火药为 2 号硝化棉; 点火压力为 9.81 MPa, 测压区段为 0 ~ 350 MPa, 采样间隔时间为 0.05 ms。在此条件下对方片层状发射药进行了测试。

4 结果与讨论

4.1 密闭爆发器试验结果

密闭爆发器试验得到的 $p-t$ 曲线如图 4 所示, 后处理得到的 $L-B$ 曲线如图 5 所示。其中 L 为动态活性, $\text{MPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$; B 为相对压力。 $L-B$ 曲线反映了火药气体生成量与已燃百分数的关系。由图 4、图 5 可知, 虽然由于实验过程中厚宽比太小而影响了实验的结果, 但是从图中可以看出, 当 B 值在 0.1 ~ 0.4 之间时方片药仍具有较好的燃烧渐增性。

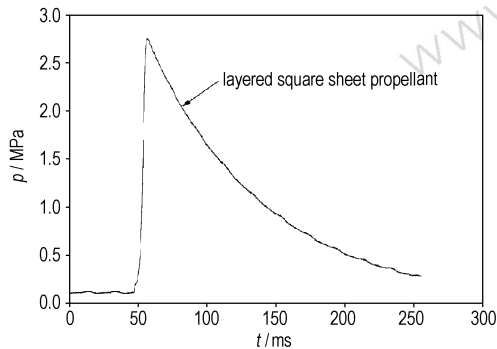


图 4 方片层状药 $p-t$ 曲线

Fig. 4 $p-t$ curve of layered square sheet propellant

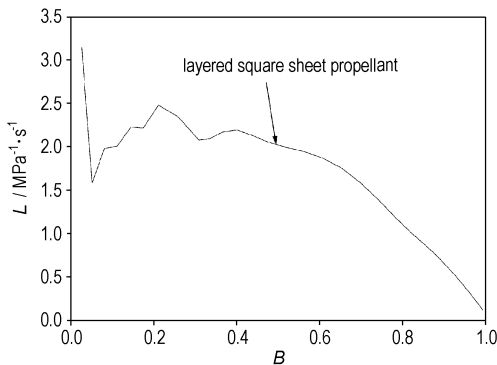


图 5 方片层状药 $L-B$ 曲线

Fig. 5 $L-B$ curve of layered square sheet propellant

4.2 药型对几何形状函数的影响

本文主要分析层状发射药药型对燃烧渐增性能的影响。即在 x_1 、 κ 、 β 及黑索今含量取值相同的情况下, 分析药型为多层管状、方片状或圆饼片状时层状发射药的燃烧渐增性能。在保证层状药具有显著的燃烧渐增性的条件下, 设层状药缓燃层厚度占总厚度的比例 x_1 为 0.2, 内外层燃速系数比 κ 为 4, 厚度与宽度之比 β 为 0.2^[10-11]。其基本参数如表 1 所示, 并用式(7)~(18)进行计算。可得 $\psi-z$ 、 $\sigma-z$ 、 $\sigma-\psi$ 曲线, 如图 6、图 7、图 8 所示。 ψ 、 σ 、 z 分别为发射药的燃烧质量分数、相对表面

积及药燃烧到某一时刻已燃厚度与初始厚度之比。

由图 6、图 7、图 8 可以看出, 方片片状层状发射药和圆饼片状层状发射药曲线变化是相同的, 这是因为方片片状层状发射药和圆饼片状层状发射药虽然表面形状不同, 但是都属于同一药型, 即都是多层片状层状发射药, 故它们的形状函数(式(11)~(18))相同。

表 1 层状发射药基本参数

Table 1 Basic parameters of layered propellants

type	x_1	κ	β
layered tubular propellant	0.2	4	0.2
layered square sheet propellant	0.2	4	0.2
layered disc sheet propellant	0.2	4	0.2

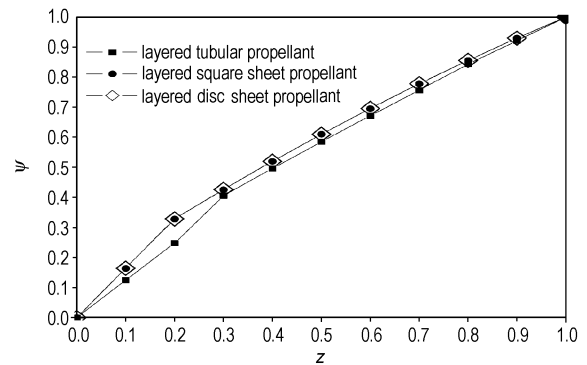


图 6 不同药型的 $\psi-z$ 曲线

Fig. 6 $\psi-z$ curves of the different models of propellants

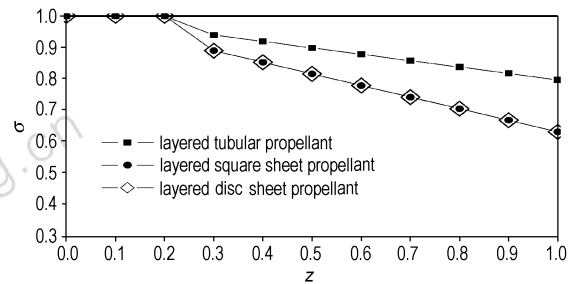


图 7 不同药型的 $\sigma-z$ 曲线

Fig. 7 $\sigma-z$ curves of the different models of propellants

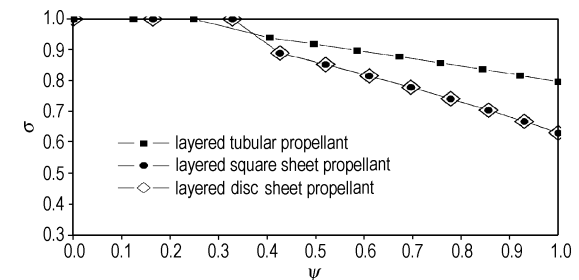


图 8 不同药型的 $\sigma-\psi$ 曲线

Fig. 8 $\sigma-\psi$ curves of the different models of propellants

由图 6 可以看出,在整个燃烧过程中从相对已燃质量 ψ 随相对已燃厚度 z 的变化来看,多层片状层状发射药比多层管状层状发射药变化略大,其 ψ 值的转折点略微向后移动,多层片状发射药比多层管状发射药的燃烧渐增性稍微好些,但是由图 7 和图 8 可以看出,在表层燃烧结束之前多层管状层状发射药表面积缩减的速率比多层片状层状发射药要慢,即多层片状层状发射药比多层管状发射药减面燃烧严重。故从整体上来说,多层管状层状发射药的燃烧渐增性要比多层片状层状发射药的好。所以在层状发射药实际生产中,为了获得比较好的燃烧渐增性,药型最好选取多层管状层状发射药。

5 结 论

(1) 方片片状层状发射药和圆饼片状层状发射药具有相同的燃烧性能。

(2) 根据不同药型建立的层状发射药形状函数,对在相同 x_1 、 κ 、 β 及相同黑索今含量条件下 ψ 、 σ 对 z 的变化进行计算。结果表明多层管状层状发射药的燃烧渐增性比多层片状层状发射药的好。

参考文献:

- [1] 萧忠良,贺增弟,刘幼平,等. 变燃速发射药的原理与实现方法[J]. 火炸药学报,2005,28(1): 25-27.
XIAO Zhong-liang, HE Zeng-di, LIU You-ping, et al. Principle and realizable approach of variable-burning rate propellant[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2005, 28(1): 25-27.
- [2] 贺增弟,刘幼平,萧忠良,等. 变燃速发射药的燃烧性能[J]. 火炸药学报,2004,27(3): 10-12.
HE Zeng-di, LIU You-ping, MA Zhong-liang, et al. Combustion property of variable-burning rate gun propellant[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2004, 27(3): 10-12.
- [3] 张丽华,马忠良,刘幼平,等. 几何尺寸对变燃速发射药燃烧性能的影响[J]. 火炸药学报,2007,30(2): 13-16.
ZHANG Li-hua, MA Zhong-liang, LIU You-ping, et al. Effect of physical dimension on combustion performance of the tubular variable burning-rate gun propellant[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2007, 30(2): 13-16.
- [4] 马忠亮,李志良,徐方亮,等. 药型尺寸对变燃速发射药燃烧渐增性的影响[J]. 含能材料,2007,15(2): 128-130.
MA Zhong-liang, LI Zhi-liang, XU Fang-liang, et al. Effect of grain size on progressive combustion of the variable burning rate propellant[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2007, 15(2): 128-130.
- [5] Rafaelix, Williams. Process for preparing progressing burning propellant granules: USP 4354884[P]. 1982.
- [6] Strauss, Bernar. Multi-layer high energy propellant: USP 5690868[P]. 1997.
- [7] 张江波,张玉成,杨雁,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): 83-86.
ZHANG Jiang-bo, ZHANG Yu-cheng, YANG Yan, et al. The interior ballistic model and numerical simulation of multilayer gun propellant charge[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2009, 32(3): 83-86.
- [8] 王琼林,刘少武,朱阳春,等. 多层硝胺发射药研究[J]. 火炸药学报,2008,31(2): 64-67.
WANG Qiong-lin, LIU Shao-wu, ZHU Yang-chun, et al. Research on multilayer disc nitramine gun propellant[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2008, 31(2): 64-67.
- [9] 张江波,张玉成,王琼林,等. 片状多层发射药的内弹道性能[J]. 火炸药学报,2009,32(2): 64-67.
ZHANG Jiang-bo, ZHANG Yu-cheng, WANG Qiong-lin, et al. Study on interior ballistic of the sheet multilayer propelling charger[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2009, 32(2): 64-67.
- [10] 蔺向阳,潘仁明,郑文芳,等. GIBR 叠层方片形发射药的燃烧特征[J]. 燃烧科学与技术,2007,13(2): 187-191.
LING Xiang-yang, PAN Ren-ming, ZHENG Wen-fang, et al. Combustion characteristics of GIBR layered square flake gun propellant[J]. *Journal of Combustion Science and Technology*, 2007, 13(2): 187-191.
- [11] 魏伦,王琼林,刘少武,等. 一种圆环状多层发射药的燃烧模型[J]. 火炸药学报,2009,32(4): 80-84.
WEI Lun, WANG Qiong-lin, LIU Shao-wu, et al. A combustion model of multilayer disc gun propellant[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2009, 32(4): 80-84.

Model Effects on Progressive Combustion Property of Layered Propellant

LU Kun, MA Zhong-liang, XIAO Zhong-liang

(North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: The shape function of the layered propellant was established to study progressive combustion property. The four main factors, including the ratio of the thickness of the slow layer to initial thickness, the burning rate ratio of the fast layer to slow layer, the ratio of the thickness of propellant to the length of propellant, the content of DRX, posed effects on the progressive combustion property of the layered propellant. Using the parameters, they were calculated and analyzed according to the geometrical model and the shape function of propellant. The variation curves of combustion quality percentage, relative surface area with burned thickness percentage were obtained. Results show that the progressive combustion property of layered tubular propellant is better than that of layered sheet propellant.

Key words: applied chemistry; layered propellant; propellant model; combustion property; shape function

CLC number: Tj55; O69

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2011.01.016