

多层管状发射药燃烧性能的数值计算

马忠亮, 鲁坤, 范雪坤, 萧忠良

(中北大学化工与环境学院, 山西 太原 030051)

摘要:为了模拟和改善层状发射药的内弹道性能和燃烧性能,建立了一种多层管状发射药的燃烧模型。在服从几何燃烧定律条件下,通过多层管状发射药的形状函数推导出其 $\Gamma-\Psi$ 表达式。用 $\Gamma-\Psi$ 曲线研究了多层管状发射药的缓燃层厚度与药片初始总厚度比、内外层的燃速比以及药柱厚度与药柱长度之比对其燃烧性能的影响。结果表明,(1)多层管状发射药缓燃层厚度与药片初始总厚度比不能太大,较佳值为0.3~0.6;(2)多层管状发射药内外层药的燃速比值越大,其燃烧渐增性越好;(3)多层管状发射药在保证能具有明显燃烧渐增性的情况下,为了提高其装填密度,其长径比应为2.5:1~5:1。

关键词:应用化学;多层管状发射药;燃烧性能;数值计算

中图分类号:TJ55; TQ562

文献标志码:A

文章编号:1007-7812(2011)02-0069-04

Numerical Calculation of Combustion Property for Multilayer Tubular Propellant

MA Zhong-liang, LU kun, FAN Xue-kun, XIAO Zhong-liang

(School of Chemical Engineering and Environment, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: The combustion model of multilayer tubular propellant was established to simulate and improve its interior ballistic property and burning behavior. And under the precondition of following the geometric combustion law, the equations describing $\Gamma-\Psi$ relation of multilayer tubular propellants were derived by using their shape functions. The influences of ratio of the thickness of the slow layer to initial thickness, the burning rate ratio of the fast layer to slow layer, and the ratio of the thickness of propellant to the length of propellant on combustion property of multilayer tubular propellants were discussed through $\Gamma-\Psi$ curves. The results show that: (1) the thickness of the slow layer to initial thickness of multilayer tubular propellants can't be too big, and it is better in 0.3-0.6; (2) when the burning rate ratio of the fast layer to slow layer of multilayer tubular propellants is bigger, its combustion progressive property is better; (3) when good progressive combustion property is ensured, the length-to-diameter ratio should value in 2.5:1-5:1 to improve its loading density.

Key words: applied chemistry; multilayer tubular propellant; burning behavior; numerical calculation

引 言

变燃速固体发射药将高能发射药技术和包覆技术结合起来,是提高火炮威力的有效方法之一^[1]。而层状发射药属于变燃速固体发射药范畴,是一类具有高燃烧渐增性、高装填密度的发射药。王琼林^[2]等采用高能硝胺发射药配方,研究了“三明治”型圆环结构的层状射药,在不增加30 mm火炮最大膛压的前提下,对比粒状高能硝胺发射药,能提高炮口动能15%左右,显示出了良好的应用潜力。张

江波^[3]等基于经典内弹道基础,建立了多层发射药的内弹道模型并进行了数值求解,结果表明,多层发射药采取3层既可达理想的效果,在不增加最大膛压的前提下,初速能够提高3.63%。层状发射药在药型上一般选择方片状、圆环片状或带状^[2-6]。但是管状层状发射药的燃烧渐增性优于选择方片状、圆环片状或带状。

本研究以多层管状发射药为对象,推导了其形状函数,通过数值模拟计算了不同内外层厚度比、燃速比、药柱长径比下发射药的燃气生成猛度,旨在为层状发射药燃烧及弹道性能方面的研究提供

收稿日期:2010-10-28; 修回日期:2011-02-16

作者简介:马忠亮(1967-),男,教授,博导,从事新型发射药及装药研究。

通讯作者:鲁坤(1984-),男,从事发射药燃烧性能研究。

参考。

1 多层管状发射药物理模型的建立

1.1 基本假设

假设多层管状发射药的初始模型如图 1 所示。

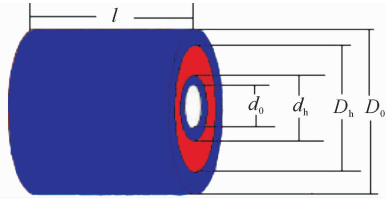


图 1 多层管状发射药结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of multilayered tubular propellant

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 $u_{\text{缓}} = u_1 p$ 和 $u_{\text{速}} = u_2 p$, 式中: u_1 、 u_2 分别为缓燃层、速燃层的燃速系数。且令速燃层、缓燃层的燃速系数之比为 k , 即 $k = \frac{u_2}{u_1}$, 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_{s} 相同, 即 $\rho_{\text{h}} = \rho_{\text{s}}$;

(4) 发射药缓燃层燃完前, 忽略端面燃烧对燃面的影响;

(5) 不考虑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) 多层管状发射药长度为 l , 外面缓燃层的内外径分别为 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} 。 $d'_{\text{h}} = d_{\text{h}}$, $D'_{\text{h}} = D_{\text{h}}$, 且两侧缓燃层厚度相等;

(7) 设缓燃层厚度占层状药总厚度的比例为 x_1 。即 $x_1 = \frac{2(D_0 - D_{\text{h}})}{D_0 - d_0}$;

(8) 设发射药燃烧到某一时刻时已燃厚度与初始厚度之比为 z ;

(9) 设发射药厚度与药柱长度之比为 β 。即 $\beta = \frac{D_0 - d_0}{l}$;

(10) 由于外层药较薄, 假定药柱端面燃烧是以内层药燃速进行的平行层燃烧。

1.2 临界长径比

长径比 $n = \frac{l}{\beta} = l / (D_0 - d_0)$ 是多层管状发射药的一个重要参数, 当长径比小于一定值时, 沿药柱

长度燃完的时间小于沿缓燃层燃完的时间, 随着燃烧的进行, 燃面和燃速不断减小, 燃气生成速率下降, 不能实现渐增燃烧。根据药柱从两个端面燃烧燃完药柱长度的时间与缓燃层径向燃完的时间相等的条件, 可得到此时的临界长径比:

$$n_1 = \frac{l}{\beta} = 2kx_1 \quad (1)$$

可见, 该临界长径比取决于药柱的初始尺寸及药柱内、外层的燃速比值, 只有当药柱的长径比大于此临界长径比时, 多层管状发射药才能显现出燃烧渐增性。

因为当沿着药柱长度燃完的时间大于沿侧面缓燃层燃完的时间, 则随着燃烧的进行, 内外层燃速的递增可以在一定程度上弥补由于燃面递减而产生的单位时间燃气生成量减小的影响, 从而可实现渐增性燃烧。并且临界长径比越大, 多层管状发射药的燃烧渐增性越明显。

2 燃气生成规律公式的推导

2.1 形状函数公式的推导

由经典内弹道理论可知, 发射药燃烧质量分数 $\Psi = \frac{m(\text{已燃药片})}{m(\text{初始药片})}$, 而已燃药片质量包括内、外层药及端面燃烧的质量。

当 $D \geq D_{\text{h}}$ (即 $z \leq x_1$) 时, 发射药燃烧质量分数 Ψ 为:

$$\Psi = z - zk\beta(x_1 - 0.5) \quad (2)$$

当 $D < D_{\text{h}}$ (即 $z > x_1$) 时, 发射药的燃烧质量分数 Ψ 为:

$$\Psi = kx_1\beta(1 - z) + z + \beta(0.5z - x_1)(1 - z) \quad (3)$$

2.2 燃气生成猛度公式的推导

发射药在压力 p 条件下的气体生成猛度 $\Gamma = \frac{1}{p}$

$\cdot \frac{d\Psi}{dt}$, 由于 $\frac{d\Psi}{dt} = \frac{d\Psi}{dz} \cdot \frac{dz}{dt}$, 假设发射药的燃速与燃烧时的压力成正比, 即 $u = u_1 p$, 令 $e_1 = \frac{D_0 - d_0}{2}$

则有:

$$\Gamma = \frac{1}{p} \frac{d\Psi}{dt} = \frac{1}{p} \frac{d\Psi}{dz} \frac{dz}{dt} = \frac{1}{p} \frac{d\Psi}{dz} \frac{1}{e_1} \frac{de}{dt} = \frac{1}{p} \frac{d\Psi}{dz} \frac{1}{e_1} u_1 p = \frac{u_1}{e_1} \frac{d\Psi}{dz} \quad (4)$$

式中: e 为发射药燃烧到某一时刻时的燃烧弧厚; u_1 为发射药燃速系数。

当 $D \geq D_{\text{h}}$ (即 $z \leq x_1$) 时:

$$\Gamma = \frac{u_1}{e_1} [1 - k\beta(x_1 - 0.5)] \quad (5)$$

当 $D < D_h$ (即 $z > x_1$) 时:

$$\Gamma = \frac{u_2}{e_1} (1 - kx_1\beta + 0.5\beta - \beta z + \beta x_1) \quad (6)$$

利用式(2)~(6), 计算了不同初始尺寸的多层管状发射药的 $\Gamma-\Psi$ 值, 并做出 $\Gamma-\Psi$ 曲线。

3 结果与讨论

3.1 缓燃层厚度 x_1 对燃烧性能的影响

选定内外层燃速比 k 为 2, e_1 为 2 mm, 发射药厚度与药柱长度之比 β 为 0.2, 缓燃层与药片初始总厚度之比 x_1 分别为 0.8、0.6、0.4 和 0.2, $\Gamma-\Psi$ 曲线如图 2 所示。

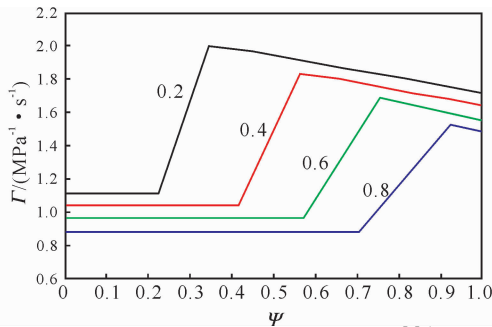


图 2 不同缓燃层厚度的 $\Gamma-\Psi$ 计算曲线

Fig. 2 Calculated $\Gamma-\Psi$ curves under different slow layer thickness

由图 2 可以看出, 多层管状药具有燃烧渐增性, 外层厚度较小时, 气体生成猛度较大, 其阶跃程度也较大; 外层厚度变大时, 初期气体生成猛度上升缓慢, 在燃烧快结束时, 气体生成猛度发生阶跃。随着厚度比由 0.2 增加到 0.8, 燃气的生成猛度减小 24%, 同时所对应的燃烧转折点后移。可见, 如果外层厚度达到一定程度, 在燃烧全过程中, 气体生成速度缓慢上升, 就很难表现出燃烧渐增性。

由此可以看出, 多层管状药外层厚度与药片初始总厚度比是决定气体生成猛度阶跃点位置的主要因素之一, 因此多层管状发射药在实际生产中缓燃层厚度不能太大, 也不能过小, 否则会影响发射药的燃烧渐增特性, 外层厚度与药片初始总厚度比较理想的取值范围应为 0.3~0.6。

3.2 内外层燃速比 k 对燃烧性能的影响

选定缓燃层与药片初始总厚度之比 x_1 为 0.4, $e_1 = 2$ mm, 发射药厚度与药柱长度之比 β 为 0.2, 内外层燃速比 k 分别为 1、2、3、4 和 5, 可得曲线如图 3 所示。

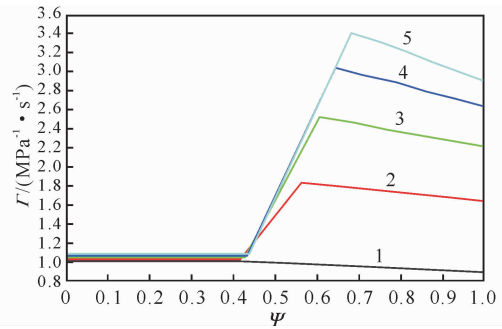


图 3 不同燃速比时 $\Gamma-\Psi$ 计算曲线

Fig. 3 Calculated $\Gamma-\Psi$ curves under different burning rate ratios

由图 3 可以看出, 多层管状药内外层药的燃速差别对其渐增性燃烧有较大的影响。在内外层燃速比取值相同的情况下, 即 $k=1$ 时, 气体生成猛度持续缓慢下降, 没有渐增性; 但随内外层燃速比的不断增大, 气体生成猛度的阶跃程度逐渐变大。当多层管状药燃速比由 2 增加到 5 时, 气体生成猛度增加了 1.9 倍, 且随着燃速比值的增大, 多层管状药的气体生成猛度转折点后移。由此看出, 多层管状药内外层药的燃速比值越大, 其燃烧渐增性越好。因此, 一般选燃速系数比较大的高能硝胺发射药为多层管状药的内层, 其外层药为添加阻燃剂、燃速较低的单基发射药。

由于含 RDX 的高能硝胺发射药存在压力指数大于 1 和燃速-压力曲线转折等问题, 所以当多层管状发射药内层药为高能硝胺发射药时, 在保证其高燃烧渐增性的情况下, 通过添加燃烧调节剂来降低多层管状药压力指数和消除燃速-压力曲线的转折等问题^[7]。

3.3 药柱长径比 n 对燃烧性能的影响

选定内外层燃速比 k 为 2, $e_1 = 2$ mm, 缓燃层与药片初始总厚度之比 x_1 为 0.4, 发射药厚度与药柱长度之比 β 分别为 0.2、0.4、0.6、0.8 和 1.0, $\Gamma-\Psi$ 曲线如图 4 所示。

由 $n = 1/\beta = l/(D_0 - d_0)$, 可以计算出多层管状发射药临界长径比 $n_1 = 1/\beta = 2kx_1 = 1.6$ 。由图 4 可以看出, 当 $\beta = 1.0, n = 1 (n = 1/\beta)$ 小于临界长径比 n_1 时, 由于药片端面燃烧较快, 气体生成猛度持续降低, 多层管状药为单纯的减面燃烧情况, 显示不出渐增燃烧的特性; 当 $\beta = 0.8$, 虽然 $n = 1.25$ 略小于临界长径比 n_1 , 但是数值比较接近, 所以显示出轻微的燃烧渐增性; 当 $\beta = 0.6, n = 1.7$ 略大于临界长径比 n_1 时, 出现气体生成猛度的阶跃, 但是阶跃的程度较小; 当 $\beta = 0.2$ 和 $\beta = 0.4, n$ 值远大于临界长径比 n_1 时, 此时气体生成猛度阶跃的程度比较

大,出现了明显的燃烧渐增性。

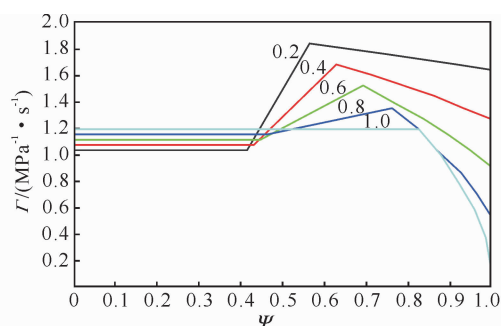


图 4 不同长径比的 $\Gamma-\psi$ 计算曲线

Fig. 4 Calculated $\Gamma-\psi$ curves under different length-to-diameter ratios

发射药的长径比不仅影响发射药的燃烧性能,还会影响发射药的装填密度。在满足燃烧性能的条件下,应缩短长径比以提高发射药的装填密度。因此,多层管状发射药的长径比应保持在 2.5 : 1 ~ 5 : 1, 这样在保证其能具有明显燃烧渐增性的情况下提高其装填密度,以满足现代身管武器对提高弹药杀伤威力的需求。

4 结 论

(1) 多层管状发射药缓燃层与药片初始总厚度之比 x_1 不应太大,取值在 0.3 ~ 0.6 较理想。

(2) 多层管状发射药内外层药燃速比 k 越大,气体生成猛度的阶跃程度越大,其燃烧渐增性越好。

(3) 多层管状发射药在保证其能具有明显燃烧渐增性的情况下,为了提高其装填密度,长径比应选 2.5 : 1 ~ 5 : 1。

参考文献:

[1] 贺增弟,刘幼平,马忠亮,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 and Propellants, 2004,27(3):10-12.

[2] 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 and Propellants, 2008,31(2): 64-67.

[3] 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 and Propellants, 2009, 32(3): 83-86.

[4] 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 and Propellants, 2009,32(2):64-67.

[5] 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.

[6] 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 and Propellants, 2009,32(4):80-84.

[7] 黄振亚,赵军,饶立胜,等. 发射药燃速压力指数对火炮内弹道的影响[J]. 弹道学报,2007,19(4): 1-4.

HUANG Zhen-ya, ZHAO Jun, RAO Li-sheng, et al. Influence of burning rate pressure exponent of propellant on gun interior ballistics[J]. Journal of Ballistics, 2007,19(4):1-4.