

方片状变燃速发射药燃气生成规律理论分析

钟建华¹, 张丽华¹, 萧忠良¹, 郭庆文^{1,2}, 马忠亮¹

(1. 中北大学化工与环境学院, 山西 太原 030051; 2. 山西省同德化工有限公司, 山西 忻州 036500)

摘要: 为建立方片状变燃速发射药气体生成猛度 Γ 与已燃发射药质量分数 Ψ 的理论表达式, 对影响其燃气生成的因素进行理论分析。在几何燃烧定律的条件下, 以初始尺寸及内外层燃速比 k 、密度比 γ 为基本参量, 分别建立了方片状变燃速发射药的 Ψ - z 与 Γ - z 表达式。通过理论计算, 讨论了方片状变燃速发射药的宽厚比 β 、内外层燃速比 k 、密度比 γ 以及外层与总弧厚比 δ 对燃气生成规律的影响。计算表明, 适当调节发射药宽厚比 δ 、内外层燃速比 k 、密度比 γ 以及外层与总弧厚比 δ 时, 可控制方片状变燃速发射药的能量释放规律。当内外层燃速比增加 3 倍, 气体生成猛度最大值增加约 2.6 倍。

关键词: 应用化学; 方片状变燃速发射药; 燃气生成规律; 燃烧渐增性

中图分类号: TJ55; O69

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.05.022

1 引言

变燃速发射药在理论上具有先进性和实践上的可实现性, 是对传统固体发射药的概念和范畴的突破^[1-2]。变燃速发射药具有其独特的燃气生成规律, 对变燃速发射药燃气生成规律的研究能够促进变燃速发射药装药设计的应用和发展。

Luman^[3-4] 等人对层状发射药的燃烧性能进行了研究, 将纳米铝颗粒和超细硼粒子以及高能氧化剂硝仿肼 (HNF) 加入发射药中, 发现只有当发射药采用正氧平衡的氧化剂时, 添加纳米铝颗粒才能起到提高发射药燃速的作用。国内多位学者^[5-9] 研究了管状变燃速发射药的工艺性能、能量性能和燃烧渐增性等性能。蔺向阳等^[10] 对三层结构的 GIBR (gradual increasing burning rate) 叠层方形发射药的燃烧特征和形状函数进行研究, 并研究了不同外层比例、燃速系数比、药片厚度与宽度之比条件下已燃质量、相对表面积随相对已燃厚度变化的规律。魏伦等^[11] 对多层圆环状发射药的燃烧机理进行了研究, 得到了不同参数的圆环状多层发射药的形状函数 Ψ - z 曲线。

火药燃烧规律是内弹道过程中的决定性因素^[12]。在上述工作基础上, 笔者建立了方片状变燃速发射药的简化模型, 从理论上分析发射药宽厚比、内外层燃速比、密度比以及外层与总厚度比对气体生成规律的影响。

2 方片状变燃速发射药燃气生成规律理论推导

2.1 基本假设

方片状变燃速发射药的燃气生成规律理论公式推导是以发射药燃烧服从几何燃烧定律为基础, 依据内弹道相关定律。假定方片状发射药燃烧过程分为两个阶段完成: 第一阶段为外层低燃速发射药与内层高燃速发射药同时燃烧, 外层发射药侧面燃烧速率与内层发射药燃烧速率相同; 第二阶段, 外层低燃速发射药燃烧结束, 内层高燃速发射药独立燃烧; 并且发射药符合几何燃烧定律, 则燃气生成规律理论公式将依据燃烧阶段逐步推导。设方片状变燃速发射药初始宽度为 $2b_1$, 内层厚度为 $2e_1$, 外层厚度为 $2e_0$, 如图 1 所示。

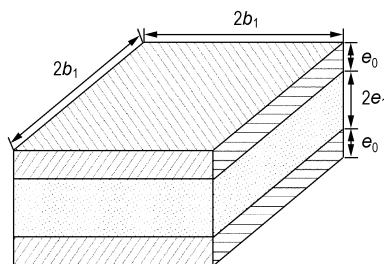


图 1 方片状变燃速发射药初始形状示意图

Fig. 1 Initial shape scheme of square plate-shaped propellant with different burning rate layers

假定内外层药的燃速分别为 u_h, u_l ; 内外层药的密度分别为 ρ_h, ρ_l ; 由于外层药较薄, 药片端面燃烧假

收稿日期: 2009-11-16; 修回日期: 2010-03-05

作者简介: 钟建华(1985-), 男, 硕士研究生, 从事发射药及装药技术研究。

定是以内层药燃速进行平行层燃烧; 设该片状变燃速发射药燃烧到某一时刻时, 厚度为 $2e$, 宽度为 $2b$; 方片状变燃速发射药内外层燃速比 $k = u_h/u_l$; 外层厚度与方片药总弧厚的比 $\delta = e_0/(e_0 + e_1)$; 药片宽度与药片总弧厚比为 $\beta = b_1/(e_0 + e_1)$ 。

2.2 方片状变燃速发射药的已燃质量分数 Ψ

当内外层发射药同时燃烧时, $e_1 < e$, 令 $x = e_0 + e_1 - e$, 则 $b_1 - b = k(e_0 + e_1 - e) = kx$, 设内外层药密度比 $y = \rho_h/\rho_l$, 方片状变燃速发射药已燃的质量分数 Ψ 为:

$$\Psi(e > e_1) = 1 - \frac{(e_0 + e_1 y - x)(b_1 - kx)^2}{(e_0 + e_1 y)b_1^2} \quad (1)$$

设 $z = x/(e_0 + e_1)$

$$\Psi(z < z_0) = 1 - \left[1 - \frac{z}{\delta + (1 - \delta)y}\right] \left(1 - \frac{kz}{\beta}\right)^2 \quad (2)$$

当外层刚燃烧完时, $e = e_1$, $b = b_1 - ke_0$, $z = z_0 = \delta$, 则可得第一阶段燃烧结束时的已燃质量分数 Ψ 值:

$$\Psi(e = e_1) = 1 - \frac{e_1 y (b_1 - ke_0)^2}{(e_0 + e_1 y)b_1^2} \quad (3)$$

$$\Psi(z = z_0) = 1 - \frac{(1 - \delta)(\beta - k\delta)^2 y}{[\delta + (1 - \delta)y]\beta^2} \quad (4)$$

当外层低燃速发射药燃烧完毕, 高燃速发射药独立燃烧时, $e < e_1$, 令 $x_1 = e_1 - e = b_1 - ke_0 - b$, 则:

$$\Psi(e < e_1) = \Psi(e = e_0) + \frac{[e_1(b_1 - ke_0)^2 - (e_1 - x_1)(b_1 - ke_0 - x_1)^2]y}{(e_0 + e_1 y)b_1^2} \quad (5)$$

令 $z = x_1/(e_0 + e_1) + z_0$, 其中 z_0 是外层燃烧结束时的已燃厚度与弧厚之比

$$\Psi(z > z_0) = 1 - \frac{(1 - z)(\beta - k\delta + \delta - z)^2 y}{[\delta + (1 - \delta)y]\beta^2} \quad (6)$$

式(2)、式(6)为方片状变燃速发射药的形状函数。

2.3 方片状变燃速发射药的气体生成猛度 Γ

发射药在压力 p 条件下气体生成猛度 $\Gamma = \frac{1}{p} \cdot \frac{d\Psi}{dt}$,

由于 $\frac{d\Psi}{dt} = \frac{d\Psi}{dx} \cdot \frac{dx}{dt}$, 假设发射药的燃速与燃烧时的压力成正比, 即 $u = u_1 p$, 则有:

$$\Gamma = u_1 \cdot \frac{d\Psi}{dx} \quad (7)$$

$$\Gamma = \frac{1}{p} \frac{d\Psi}{dt} = \frac{1}{p} \frac{d\Psi}{dz} \frac{dz}{dt} = \frac{1}{p} \frac{d\Psi}{dz} \frac{1}{e_1 + e_0} \frac{dx}{dt} = \frac{1}{p} \frac{dx}{dz} \frac{1}{e_1 + e_0} u_1 p = \frac{u_1}{e_1 + e_0} \frac{d\Psi}{dz} \quad (8)$$

式中, u_1 为发射药燃速压力系数。

将式(1)对 x 求导或式(2)对 z 求导, 可得 $e > e_1$ 时的 Γ 值:

$$\Gamma(e > e_1) = \frac{u_{l,1}(2ke_0 + eke_1 y + b_1 - 3kx)(b_1 - kx)}{(e_0 + e_1 y)b_1^2} \quad (9)$$

$$\Gamma(z < z_0) = \frac{u_{l,1}[\beta + 2k + 2k\delta(1 - y) - 3kz](\beta - kz)}{e_1[\delta + (1 - \delta)y]\beta^2} \quad (10)$$

式中, $u_{l,1}$ 是低燃速层发射药燃速压力系数。

将式(5)对 x_1 求导或式(6)对 z 求导, 可得到 $e < e_1$ 时的 Γ 值:

$$\Gamma(e < e_1) = \frac{u_{h,1}(b_1 - ke_0 - x_1)(b_1 - ke_0 + 2e_1 - 3x_1)y}{(e_0 + e_1 y)b_1^2} \quad (11)$$

$$\Gamma(z > z_0) = \frac{u_{h,1}(\beta - k\delta + \delta - z)(\beta - k\delta + \delta + 2 - 3z)y}{e_1[\delta + (1 - \delta)y]\beta^2} \quad (12)$$

式中, $u_{h,1}$ 是高燃速发射药燃速压力系数

2.4 方片状变燃速发射药的临界宽厚比

宽厚比 $\beta = b_1/(e_0 + e_1)$ 是片状变燃速发射药的一个重要参数, 当宽厚比小于一定值时, 由于药片端面燃烧较快而使发射药未实现其燃烧渐增性就燃烧结束。根据药片从两个端面燃烧完药片长度的时间与外层燃烧完的时间相等的条件, 可得到临界宽厚比 β_1 为:

$$\beta_1 = \frac{ke_0}{e_0 + e_1} = k\delta \quad (13)$$

由式(13)可知, 临界宽厚比取决于内外层燃速比和外层厚度与总弧厚之比。随着内外层燃速比增大, 方片状变燃速发射药端面燃烧效应明显, 临界宽厚比也随之相应增大。外层厚度与总弧厚之比增大, 外层燃烧时间较长, 相应临界宽厚比也随之增大。

3 计算结果与讨论

利用式(2)、(6)、(10)、(12), 采用不同初始尺寸、内外燃速比和密度比的方片状变燃速发射药, 利用 fortran 进行编程, 计算出相同 z 时相对的 Γ 与 Ψ 值, 从而得到 Γ - Ψ 曲线。

3.1 药片宽厚对方片状变燃速发射药燃烧规律影响

药片宽厚比不同的方片状变燃速发射药 Γ - Ψ 曲线如图 2 所示。其对应的条件为 $k = 2.0$, $y = 1.20$, $\delta = 0.2$, $2(e_0 + e_1) = 2.5 \text{ mm}$, $\beta_1 = 0.4$; 图 2 中曲线宽厚比 β 分别为 0.3, 0.4, 1.0, 1.5, 5, 10, 20。如图 2 所示, 当 $\beta \leq \beta_1$ 时, 由于药片端面燃烧较快, 片状变燃速发射药为减面燃烧, 气体生成猛度逐渐下降, 无阶跃特征。当 $\beta > \beta_1$ 时, 外层发射药燃烧结束, 内层发射药由于燃烧速度快使气体生成猛度发生阶跃。随着 β 值增加, 气体生成猛度增大, 同时 Γ 值的阶跃位置在

Γ - Ψ 曲线上较靠前。当 β 值较小时, Γ 值随着 Ψ 增加而减小的趋势较大, 端面的燃烧作用对发射药燃烧面积的影响较大; 当 β 值较大时, Γ 值随着 Ψ 增加而减小的趋势变小, 端面的燃烧作用对发射药燃烧面积的影响较小。

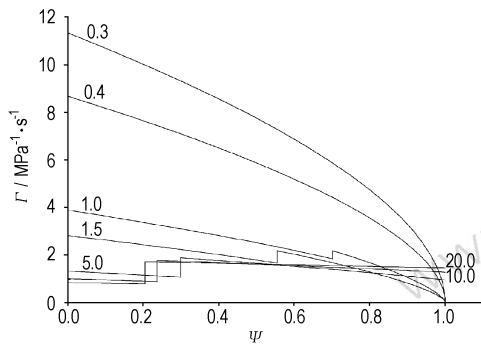


图 2 不同宽厚比时的 Γ - Ψ 曲线
Fig. 2 Γ - Ψ curves with different width-thickness ratios

3.2 外层厚度与药片弧厚之比对方片状变燃速发射药燃烧规律影响

外层厚度与药片弧厚之比对方片状变燃速发射药 Γ - Ψ 曲线的影响如图 3 所示。其中 $k=2.0$, $\gamma=1.2$, $2(e_0 + e_1) = 2.5$ mm, $\beta=10$; 图中外层厚度与总弧厚之比 δ 分别为 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5。从图 3 可知, 随着外层厚度与药片弧厚之比增加, 气体猛度阶跃点位于较大的 Ψ 值处, 阶跃程度略有减小。外层厚度与药片弧厚之比从 0.1 增加到 0.5, 方片状变燃速发射药气体生成猛度阶跃位置由 0.12 移动至 0.55。由此看出, 外层厚度与药片弧厚之比是决定气体生成猛度阶跃点位置的主要因素, 通过调节发射药外层厚度与药片弧厚的比值可以有效地控制枪炮膛压的变化。

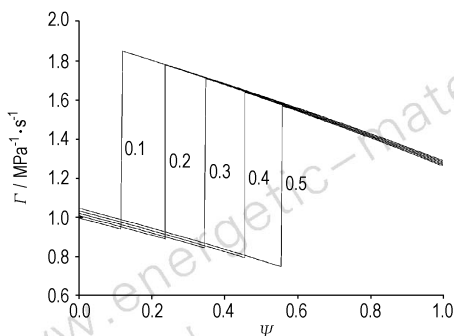


图 3 不同外层厚度与弧厚之比时的 Γ - Ψ 曲线
Fig. 3 Γ - Ψ curves with different outer-to-total thickness ratios

3.3 密度对方片状变燃速发射药燃烧规律影响

图 4 为不同内外层密度比时的 Γ - Ψ 曲线, $k=1.5$, $2(e_0 + e_1) = 2.5$ mm, $\beta=10$, $\delta=0.2$; 图 4 中

密度比分别为 1.01, 1.10, 1.20, 1.30。由图 4 可以看出, 随着内外层密度比的增加, 气体生成猛度的阶跃程度也随之增加, Γ 值的阶跃位置向前移。

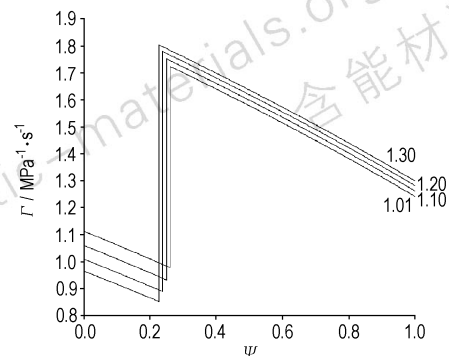


图 4 不同内外层密度比时的 Γ - Ψ 曲线
Fig. 4 Γ - Ψ curves with different density ratios

3.4 内外层燃速比对变燃速发射药燃烧规律影响

图 5 是药片尺寸相同时内外层燃速比不同的 Γ - Ψ 曲线, $2(e_0 + e_1) = 2.50$, $\beta=10$, $\delta=0.2$, $\gamma=1.20$; 图 5 中曲线内外层燃速比 k 分别为 1.1, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0。由图 5 可见, 方片状变燃速发射药内外层的燃速差别对其渐增性燃烧影响较大。内外层燃速比增加 3 倍, 气体生成猛度最大值增加约 2.6 倍。燃速差别越大, 气体生成猛度的阶跃程度也大; 同时, 因端面燃烧较快, 方片状发射药外层燃烧减面燃烧效应明显。当内外层药的燃速比值 k 较大时, Γ 值的阶跃位置在 Γ - Ψ 曲线上较为靠后, 并且阶跃程度相应较大。

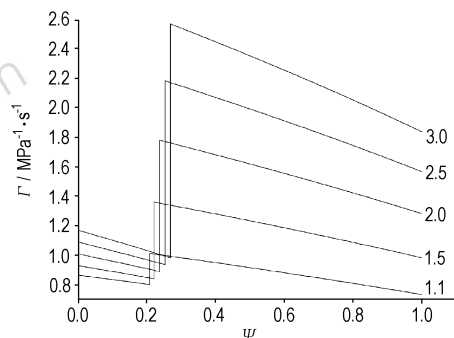


图 5 不同燃速比时的 Γ - Ψ 曲线
Fig. 5 Γ - Ψ curves with different burning-rate ratios

4 结论

(1) 理论计算 Γ - Ψ 曲线表明, 方片状变燃速发射药由于内外层基药燃速、密度的不同, 能够呈现出燃速渐增性, 从而达到燃烧渐增的目的。

(2) 由方片状变燃速发射药燃气生成规律理论推导和数值计算表明, 当发射药宽厚比小于临界宽厚比

时, Γ - Ψ 理论曲线上无阶跃现象, 即发射药无渐增性; 当发射药宽厚比大于临界宽厚比时, Γ - Ψ 理论曲线上呈现出阶跃。

(3) 方片状变燃速发射药内外层燃速比较大时, 阶跃位置在 Γ - Ψ 曲线上较阶跃位置在 Γ - Ψ 曲线上后移, 并且阶跃程度较大, 内外层燃速比增加 3 倍, 气体生成猛度最大值增加约 2.6 倍, 是影响方片状变燃速发射药燃气生成猛度阶跃程度的主要因素。

(4) 随着外层厚度与药片弧厚之比增加, Γ 阶跃点位置明显移向较大的 Ψ 值处, 阶跃程度略有减小, 外层厚度与药片弧厚之比从 0.1 增加到 0.5, 方片状变燃速发射药气体生成猛度阶跃位置由 0.12 左右移动至 0.55 左右, 是燃烧阶跃点位置的主要决定因素。

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 and Propellants*, 2005, 28(1): 25-27.
- [2] 萧忠良. 一种变燃速固体发射药: 中国国防发明专利 0111010916[P].
- [3] Brown J J, Thynell S T, Kuo K K. Regression Behavior of Composite Layered Gun Propellants[M]. Pennsylvania State University, 1993.
- [4] Luman J R, Wehrman B, Kuo K K. Development and characterization of high performance solid propellants containing nano-sized energetic ingredients[C]// Proceedings of the Combustion Institute, 2007, 31: 2089-2096.
- [5] 王泽山. 控制发射药燃气生成规律的一种方法[J]. 中北大学学报(原华北工学院学报), 2001, 22(4): 252-255.
WANG Ze-shan. A method of propellant charge technique to control the gas generation rate[J]. *Journal of North University of*
- [6] 张丽华, 贺增弟, 萧忠良. 双层管状变燃速发射药的燃气生成规律[J]. 火炸药学报, 2006, 29(6): 65-68.
ZHANG Li-hua, HE Zeng-di, XIAO Zhong-liang. Gas generation rule about tubular gun propellant with two different burning rate layers[J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2006, 29(6): 65-68.
- [7] 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 character of variable-burning rate gun propellant[J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2004, 27(3): 10-12.
- [8] 贺增弟, 刘幼平, 马忠亮, 等. 变燃速发射药的低温感性能[J]. 火炸药学报, 2006, 29(1): 65-67.
HE Zeng-di, LIU You-ping, MA Zhong-liang, et al. Low temperature sensitivity of variable burning rate gun propellant[J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2006, 29(1): 65-67.
- [9] 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 bring rate propellant[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2007, 15(2): 128-130.
- [10] 蔺向阳, 潘仁明, 薛耀辉. GIBR 叠层方形发射药的燃烧特征[J]. 燃烧科学与技术, 2007, 13(2): 187-191.
LIN Xiang-yang, PAN Ren-ming, XUE Yao-hui. Combustion characteristic 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(4): 80-83.
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(4): 80-83.
- [12] 金志明. 枪炮内弹道学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004: 19-46.
JIN Zhi-ming. Interior Ballistic of Gun Propellant[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2004.

Theoretical Analysis of Gas Generation about Variable Burning Rate Gun Propellant with Square Plate-shape

ZHONG Jian-hua¹, ZHANG Li-hua¹, XIAO Zhong-liang¹, WU Qing-wen^{1,2}, MA Zhong-liang¹

(1. College of Chemical Engineering and Environment, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. Shanxi Tongde Chemical Co., Xinzhou 036500, China)

Abstract: To establish the Γ - Ψ expression of variable burning rate gun propellant with square plate-shape, the factors affecting its gas generation were analyzed theoretically. On the condition of geometric combustion law, the theoretical expression between Γ and Ψ were derived, taking the initial size, burning-rate ratios, and density ratio as the basic parameters. By theoretical calculation, influences of width-thickness ratios, outer-to-total thickness ratios, density ratios and burning-rate ratios on the gas generation rule were discussed. The results show that variable burning rate gun propellant with square plate-shape can control the energy release law by using the appropriate width-thickness ratios, outer-to-total thickness ratios, density ratios and burning-rate ratios. The brisance of gas generation increases by 2.6 times when the inner and outer combustion speed ratio triples.

Key words: applied chemistry; variable burning rate gun propellant with square plate-shape; gas generation rule; burning progression

CLC number: TJ55; O69

Document code: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2010.05.022