文章编号：1006-9941(2015)03-0243-05

七孔变燃速发射药燃烧性能的数值计算

刘 平，马忠亮，王率宇，柴 俊
(中北大学化工与环境学院，山西 太原 030051)

摘 要：为模拟七孔变燃速发射药的燃烧性能，建立了七孔变燃速发射药的燃烧模型。在几何燃烧定律的基础上推导出燃气生成猛度 Γ 和已燃发射药百分数 Ψ 的函数关系。通过编程计算得到 Γ-Ψ 曲线。分析了燃速比、速燃层内孔径、长径比和缓燃层厚度与燃速层厚度之比对七孔变燃速发射药燃烧渐增性的影响。结果表明：速燃层和缓燃层的燃速比为 1.5 ~2.5，长径比为 2 ~3，缓燃层厚度与速燃层厚度之比为 0.1 ~0.22，速燃层内孔径为 0.2 ~0.3 mm 的七孔变燃速发射药有较好的燃烧渐增性。

关键词：七孔变燃速发射药；燃烧性能；数值计算
中图分类号：TJ55；O69 **文献标志码**：A **DOI**：10.11943/j.issn.1006-9941.2015.03.008

1 引 言

发射药燃烧规律是内弹道研究的首要问题，综合体现在燃气生成规律上。而燃气生成规律取决于火药的燃烧面积和火药燃烧速度的变化规律[1]。萧忠良等[2]将高能发射药技术和包覆技术结合起来，通过改变内外层发射药的燃速达到能量释放的渐增性。魏伦等[3-4]建立了一种圆环状多层发射药的燃烧模型，通过理论和实验分析了其燃烧性能，结果表明内外层发射药的燃速比(厚度比)在一定的范围内越大，渐增性越好，药片的宽厚比越大，燃烧渐增性增强。马忠亮等[5]对多层管状发射药的燃烧性能进行了数值计算，理论上分析了燃速比、缓燃层厚度、长径比对燃烧渐增性的影响。寇波等[6]对新型渐增燃烧球形发射药的燃烧性能进行了数值计算和实验验证。

七孔变燃速发射药是在单孔管状变燃速发射药的基础上将速燃层发射药由单孔变为七孔，从改变燃面和燃速两个方面来提高发射药的燃烧渐增性，在理论上拥有比单孔管状变燃速发射药更好的燃烧渐增性。目前，国内外关于变燃速发射药和七孔发射药的研究较多，但关于七孔变燃速发射药燃烧性能的研究还未见报道。为了解七孔变燃速发射药燃烧渐增性的影响因素，建立了七孔变燃速发射药的燃烧模型，推导了其形状函数，通过数值模拟计算了其燃烧猛度-已燃百分数(Γ-Ψ)曲线，分析了燃速比 k、速燃层内孔径 d_0、长径比和缓燃层厚度对七孔变燃速发射药燃烧渐增性的影响。

收稿日期：2013-11-26；**修回日期**：2014-03-18
基金项目：国防预研基金(404060401)
作者简介：刘平(1989-)，男，硕士研究生，主要从事发射药研究。e-mail：liuping9_9@163.com

2 七孔变燃速发射药物理燃烧模型

七孔变燃速发射药内层为添加了高能填料的硝胺发射药，燃速较快；外层为添加了缓燃剂的单基药，燃速较慢[7]。其物理燃烧模型建立在几何燃烧定律的基础上，将发射药的燃烧过程看作是按药粒表面平行层逐层燃烧，并在此基础上进行了一系列的简化和假设。

2.1 物理燃烧模型建立的条件和假设

图 1 为七孔变燃速发射药的结构示意图。

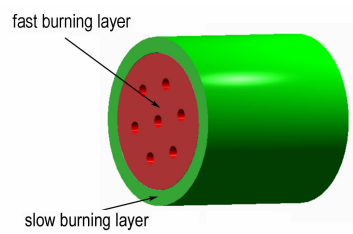

图 1 七孔变燃速发射药结构图

Fig.1 Structure of seven-hole variable burning-rate gun propellant

为简化计算过程，现做如下假设：

(1) 所有药粒的物理化学性质均一，具有完全相

同的几何形状和尺寸；所有药粒的表面同时被点燃，并且具有相同的燃烧环境（T、p 均相同）。

（2）七孔变燃速发射药的缓燃层、速燃层的燃速分别为 $u_{缓}=u_1p$ 和 $u_{速}=u_2p$，u_1 和 u_2 分别为缓燃层和速燃层的燃速系数，燃速比 $k=u_2/u_1$，且 $k>1$。

（3）药粒缓燃层外径为 D_0，速燃层内孔孔径为 d_0，速燃层外径为 D_h，药粒长度为 $2c$，长径比 $x=2c/D_0$，缓燃层厚度 $\Delta d=(D_0-D_h)/2$。

（4）速燃层和缓燃层的密度相同；不考虑速燃层和缓燃层界面的影响，缓燃层燃完后，界面处的速燃层立即开始燃烧；不同层发射药燃烧产生的气体相互不发生反应。

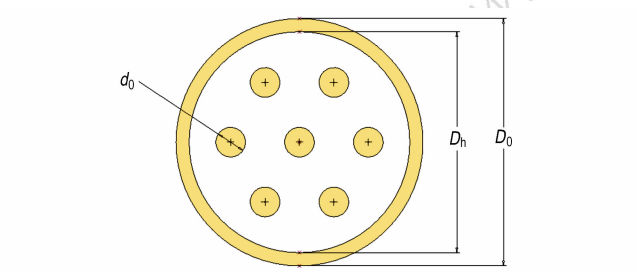

图 2 七孔变燃速发射药横截面尺寸图

Fig. 2 Cross-section size of seven-hole variable burning rate gun propellant

2.2 初始参数应满足的条件

当其他参数确定时，若燃速比大于一定值，在缓燃层燃完之前，速燃层就已经分裂，分裂后减面燃烧，这样不利于提高发射药的燃烧渐增性。同理，要保证缓燃层在速燃层分裂之前燃完，孔径和缓燃层厚度也不能太大。根据七孔变燃速发射药的几何结构，计算出缓燃层恰好燃完时的时间要小于速燃层恰好分裂时的时间，由此可以得到初始参数应满足的条件：

$$6k(D_0-D_h)/2<D_h-3d_0 \tag{1}$$

2.3 临界长径比

长径比是七孔变燃速发射药的另外一个重要参数。发射药按照平行层燃烧规律燃烧，如果长径比太小，沿七孔变燃速发射药横两端面法线方向的速燃层燃完的时间小于缓燃层燃完的时间，导致燃速逐渐变小，燃气生成速率下降，渐增性变差。根据七孔变燃速发射药的几何结构，要求速燃层沿七孔变燃速发射药两端面燃完的时间大于缓燃层径向燃完的时间。计算出临界长径比 x_0：

$$x_0=k(D_0-D_h)/D_0 \tag{2}$$

由此可见，临界长径比是一个与燃速比和药柱初始尺寸都相关的物理量。燃速比越大，临界长径比越大；缓燃层的厚度占药柱外径的比例越大，长径比越大。只有长径比大于该临界值时，燃面渐增性和燃速渐增性才能同时发挥作用，使七孔变燃速发射药的燃烧渐增性更好。按照几何燃烧定律，长径比越大，燃烧渐增性越好，但是考虑到实际的燃烧情况，发射药在点燃时，很难做到所有的药柱表面都同时点燃，太大的长径比会导致内孔的透气性变差，侵蚀燃烧变严重，远离端面的内孔表面不易被点燃，显示出减面燃烧的特征，无法达到预期的渐增性。因此，长径比应该大于临界长径比，并在合适的范围内取值。

3 燃烧规律公式的的计算与推导

在确定燃速比等参数满足的条件之后，令某一时刻发射药已燃烧的厚度为 e，长度为 $2c_1$，根据几何关系推导出七孔变燃速发射药的已燃百分数与已燃烧厚度的函数 $\Psi(e)$ 和燃气生成猛度与已燃烧厚度的函数 $\Gamma(e)$。

3.1 已燃百分数的计算

根据几何燃烧定律[1]可知，七孔变燃速发射药的已燃百分数

$$\Psi=\frac{m_{已燃}}{m_{初始}}=\frac{\rho V_{已燃}}{\rho V}=\frac{V_{已燃}}{V}=1-\frac{V_{剩余}}{V} \tag{3}$$

式中，$m_{已燃}$ 为某一时刻发射药的已燃质量，kg；$V_{已燃}$ 为该时刻已燃体积，m^3；$m_{剩余}$ 为某一时刻发射药的剩余质量，kg；$V_{剩余}$ 为该时刻剩余体积，m^3；V 为发射药未燃烧时的体积，m^3。

根据已建立的七孔变燃速发射药燃烧的物理模型，可以把七孔变燃速发射药的燃烧分为三个阶段，同时得到各个阶段的已燃百分数：

（1）缓燃层和速燃层同时燃烧阶段（$0<e<(D_0-D_h)/2$）的已燃百分数见式（4）。

（2）缓燃层燃烧结束到速燃层分裂阶段，此时 $(D_0-D_h)/2<e<e_{div}$，其中 e_{div} 为七孔变燃速发射药刚好分裂时已燃烧的厚度。设某一时刻从速燃层表面开

$$\Psi_1=\frac{[(4cD_0+D_0^2-D_h^2+28ckd_0+kD_h^2-7kd_0^2)e+(28ck^2-4D_0-4c-28k^2d_0)e^2+(4-28k^3)e^3]}{[(D_0^2-7d_0^2)*c]} \tag{4}$$

$$\Psi_2=\frac{[(cD_0^2-7cd_0^2-c1D_h^2+7c_1d_1^2)+(4c_1D_h+28c_1d_1+D_h^2-7d_1^2)e_1-(4D_h+28d_1-24c_1)e_1{}^2-24e_1^3]}{[(D_0^2-7d_0^2)c]} \tag{5}$$

始已燃烧的厚度为 e_1，则 $e_1=e-(D_0-D_h)/2$，此阶段已燃百分数为见式(5)。

式中，c_1 为缓燃层恰好燃烧结束时药柱的长度，d_1 为缓燃层恰好燃烧完时药柱内孔的孔径。

(3) 速燃层分裂后到燃完阶段($e<e_{div}$)

速燃层分裂后，形成 12 个曲边三棱柱体，具有很强的减面性，燃气生成猛度急剧下降，呈现出减面燃烧。由于这一阶段发射药剩余体积较少，已接近燃烧末期，对发射药燃烧渐增性影响较小，其相关函数在此未做推导。

3.2 燃气生成猛度的计算

在压力 p 条件下发射药的燃气生成猛度 $\Gamma=\frac{1}{p}\frac{d\Psi}{dt}$[8]，根据发射药的燃速方程 $u=\frac{de}{dt}=u_1p^n$，式中，n 为枪炮发射药的燃速压力指数，近似取 1。则燃气生成猛度

$$\Gamma=\frac{1}{p}\frac{d\Psi}{de}\frac{de}{dt}=\frac{1}{p}\frac{d\Psi}{de}u_1p^n=u_1\frac{d\Psi}{de} \tag{6}$$

根据式(3)~式(6)可以分别得到各个阶段的燃气生成猛度：

(1) 当 $0<e<D_0-D_h/2$ 时

$$\Gamma_1=u_1\frac{(4cD_0+D_0^2-D_h^2+28ckd_0+kD_h^2-7kd_0^2)+8(7ck^2-D_0-c-7k^2d_0)e+12(1-7k^3)e^2}{[(D_0^2-7d_0^2)]} \tag{7}$$

式中，u_1 为缓燃层发射药的燃速系数。

(2) 当 $(D_0-D_h)/2<e<e_{div}$ 时

$$\Gamma_2=u_2\frac{(4c_1D_h+28c_1d_1+D_h^2-7d_1^2)-8(D_h+7d_1-6c_1)e-72e^2}{[(D_0^2-7d_0^2)]} \tag{8}$$

式中，u_2 为速燃层发射药的燃速系数。

4 结果与分析

根据式(1)~式(8)，编写 C++程序，分别取不同的燃速比、缓燃层厚度、长径比和孔径进行计算，得出相应的 Γ-Ψ 曲线，分析各因素对七孔变燃速发射药燃烧渐增性的影响。

4.1 燃速比对七孔变燃速发射药燃烧渐增性的影响

根据燃速比实际取值范围，取不同的燃速比值 k=1.0、1.5、2.0、2.5、3.0 进行计算，得到不同燃速比所对应的 Γ-Ψ 曲线，如图 3 所示。

由图 3 可知，燃速比 k=1 的普通七孔药燃烧 Γ-Ψ 曲线不会出现阶跃，k>1 的七孔变燃速发射药在内孔分裂前呈现渐增性燃烧。七孔变燃速发射药的内层采用燃速较高的高能硝胺发射药，外层采用燃速较低的发射药，发射药点燃的初始阶段，缓燃层和速燃层同时燃烧，燃烧面积逐渐增加，燃气生成猛度增大。由于缓燃层的燃面要远大于速燃层的燃面，此阶段燃气生成速率较低。缓燃层燃烧结束后，缓燃层和速燃层界面处的速燃层被点燃，速燃层的燃面突然增大，导致燃气生成速率突然增大，在 Γ-Ψ 曲线上形成一个阶跃。参照文献[5]和文献[9]可知，普通单孔变燃速发射药在缓燃层燃完时，也会出现阶跃，表现出渐增性，但在缓燃层燃完结束前后，都呈现出减面燃烧，曲线呈现下降趋势，其燃烧渐增性能比七孔变燃速发射药要差。由此可知，七孔变燃速发射药的燃烧渐增性在理论上比单孔变燃速发射药更好。

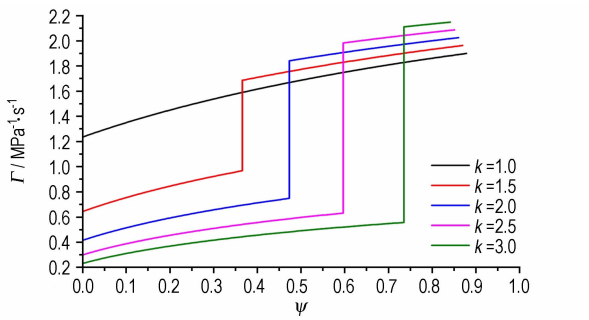

图 3 不同燃速比七孔变燃速发射药的 Γ-Ψ 曲线

Fig. 3 Γ-Ψ curves of seven-hole variable burning rate gun propellant with different burning rate ratios

根据不同燃速比的 Γ-Ψ 曲线可以看出，燃速比越大的七孔变燃速发射药，在缓燃层燃完之前，燃气生成猛度越小；燃速比越大的发射药，当缓燃层刚燃完时，速燃层内孔的表面积越大，燃气生成猛度也越大，缓燃层燃完瞬间，曲线的阶跃越大；缓燃层与速燃层界面被点燃后，燃速比越大的发射药燃气生成猛度越大。随着燃速比增大，缓燃层燃烧结束时发射药已燃百分数越大，当燃速比为 3 时，七孔变燃速发射药在已燃分数达到 0.75 才发生阶跃，剩余发射药较少，对渐增性贡献较小，综合考虑，燃速比取值在 1.5~2.5 之间为宜。

4.2 长径比对七孔变燃速发射药燃烧渐增性的影响

保持燃速比、缓燃层厚度和孔径一定，根据临界长径比的值，分别取不同的长径比进行计算。经计算临界长径比 n=1，选取长径比 n=0.5、0.75、1.0、1.5、3.0 进行计算，得出不同长径比七孔变燃速发射药的 Γ-Ψ 曲线如图 4 所示。

由图 4 可知，当长径比小于临界长径比时，七孔变燃速发射药在阶跃前后，燃气生成猛度都为下降的趋势，由于长径比较小的情况下，端面燃烧的影响较大，导致发射药呈现出减面燃烧。长径比大于临界长径比

时，在内孔分列前，燃气生成猛度呈逐渐增加的趋势，且长径比越大，燃气生成猛度越大，缓燃层燃完时的已燃百分数越小。

在理论情况下，七孔变燃速发射药的长径比越大，其燃烧渐增性越好，但长径比较大的七孔发射药，容易堵孔，在点火时其内孔不能和外表面同时被点燃，出现侵蚀燃烧，所以考虑到实际情况长径比的值也不能太大，一般取 $n=2\sim3$。

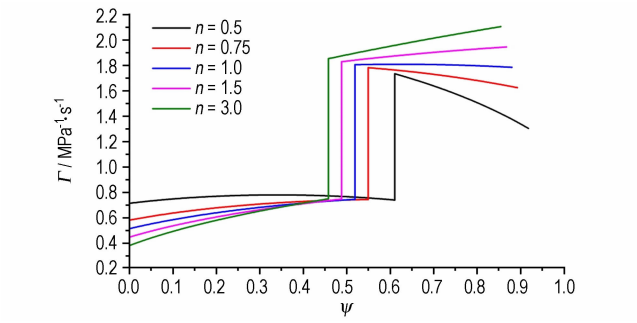

图 4 不同长径比七孔变燃速发射药的 Γ-Ψ 曲线

Fig. 4 Γ-Ψ curves of seven-hole variable burning rate gun propellant with different length-to-diameter ratios

4.3 缓燃层厚度与燃速层厚度之比对七孔变燃速发射药燃烧渐增性的影响

在相同的外径、孔径和长径比的条件下，改变缓燃层厚度，根据缓燃层应满足的初始条件，分别取 0.05，0.1，0.15，0.2，0.25 mm。计算出不同缓燃层厚度七孔变燃速发射药的 Γ-Ψ 曲线如图 5 所示。

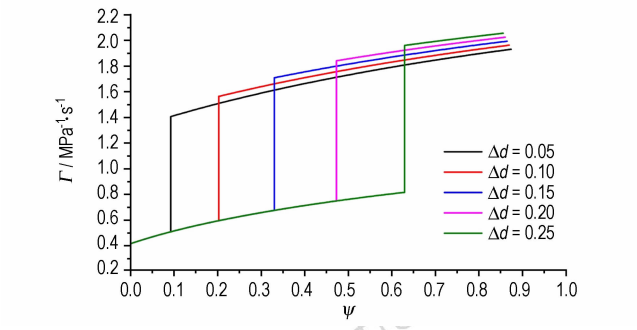

图 5 不同缓燃层厚度七孔变燃速发射药的 Γ-Ψ 曲线

Fig. 5 Γ-Ψ curves of seven-hole variable burning rate gun propellant with different slow layer thickness

由图 5 可以看出，在满足假设条件的基础上，不同缓燃层厚度的七孔变燃速发射药燃气生成猛度在分裂前一直增大，整体呈现出渐增性燃烧。开始燃烧时，不同缓燃层厚度的发射药的燃气生成猛度相同，缓燃层厚度越大的七孔变燃速发射药燃烧发生阶跃时越靠后，缓燃层燃完后的燃气生成猛度越大。

缓燃层厚度越大的七孔变燃速发射药，在燃烧时，外层燃完的时间越长，外层燃完时发射药已燃百分数越大，当缓燃层厚度由 0.05 mm 增加到 0.25 mm 时，发生阶跃之后的燃气生成猛度相差不大，但已燃百分数由 0.1 增加到 0.64。因此可以看出，缓燃层厚度影响七孔变燃速发射药的渐增性。厚度太大时阶跃发生太晚，不利于渐增性性燃烧，这种情况下缓燃层所占比例太高，同时也会降低发射药的能量。当缓燃层厚度太小时，阶跃发生太早，减弱了包覆作用，对渐增性的影响效果不明显。结合理论分析和实际情况，当燃速比和孔径取适当的值时，由式(1)计算可得，缓燃层厚度与速燃层厚度之比在 0.1～0.22 之间较为合适。

4.4 速燃层内孔径对七孔变燃速发射药燃烧渐增性的影响

在燃速比、长径比和缓燃层厚度相同的条件下，改变七孔变燃速发射药速燃层内孔径，根据式(1)确定孔径的取值范围，分别取 0.1，0.2，0.3，0.4，0.5 mm 进行计算，得出不同孔径七孔变燃速发射药 Γ-Ψ 曲线如图 6 所示。由图 6 可以看出，当七孔变燃速发射药的速燃层内孔径不同时，表现出相近的变化趋势，缓燃层燃完前后，发射药都表现出渐增性燃烧，缓燃层燃完时发生阶跃。当孔径由 0.1 mm 增加到 0.5 mm 时，刚开始燃烧时的燃气生成猛度和发生阶跃之后的燃气猛度都同时增大。由图可知，随着七孔变燃速发射药的孔径变大，燃烧发生阶跃时的已燃百分数也越大，当阶跃发生太过靠后时，不利于提高渐增性。因此，结合实际情况七孔变燃速发射药的速燃层内孔径一般取值为 0.2～0.3 mm。

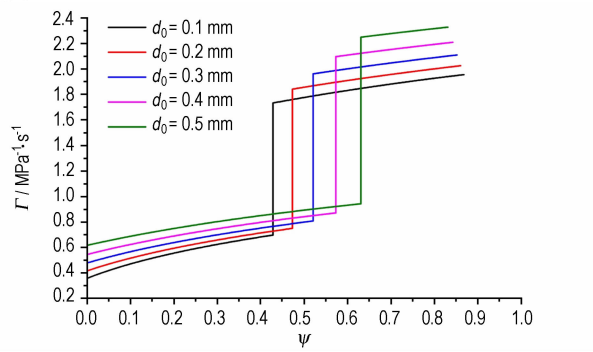

图 6 不同孔径七孔变燃速发射药的 Γ-Ψ 曲线

Fig. 6 Γ-Ψ curves of seven-hole variable burning rate gun propellant with different pore diameter

5 结 论

(1) 在几何燃烧定律的基础上对七孔变燃速发射

药的燃烧性能进行了计算分析,结果表明,七孔变燃速发射药在缓燃层燃烧结束时会出现阶跃,内孔破裂前呈现渐增性燃烧。与普通七孔发射药和单孔变燃速发射药相比,具有更好的燃烧渐增性。

(2)七孔变燃速发射药的内外层燃速比、长径比、缓燃层厚度、内孔孔径都影响燃烧渐增性和发生阶跃时的位置。为保证较好的燃烧渐增性,七孔变燃速发射药的燃速比取1.5~2.5,长径比取2~3,缓燃层厚度与速燃层厚度之比取0.1~0.22,速燃层内孔径取0.2~0.3 mm较为合适。

参考文献:

[1] 金志明. 枪炮内弹道学[M]. 北京:北京理工大学出版社,2004.
JIN Zhi-ming. Interior ballistic of gun propellant [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2004.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 魏伦,王琼林,刘少武,等. 多层发射药的燃烧特性[J]. 火炸药学报,2010,33(1):75-78.
WEI Lun, WANG Qiong-lin, LIU Shao-wu, et al. Combustion characteristics of multilayer gun propellant[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2010, 33(1): 75-78.

[5] 马忠亮,鲁坤,范雪坤,等. 多层管状发射药燃烧性能的数值计算[J]. 火炸药学报,2011,34(2):69-72.
MA Zhong-liang, LU Kun, FAN Xue-kun, et al. Numerical calculation of combustion property for multilayer tubular propellant [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2011, 34(2): 69-72.

[6] 寇波,刘玉军,蔺向阳,等. 新型渐增燃烧球形发射药的燃烧性能[J]. 燃烧科学与技术,2011,17(4):327-331.
KOU Bo, LIU Yu-jun, Lin Xiang-yang, et al. Combustion perforance of new style progressive buming spherical propellant[J]. *Joumal of Combustion Science and Technology*, 2011, 17(4): 327-331.

[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 of variable-burning rate gun propellant [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2004, 27(3): 10-12.

[8] 鲁坤,马忠亮,萧忠良. 药型对层状发射药燃烧渐增性的影响[J]. 含能材料,2011,19(1):69-73.
LU Kun, MA Zhong-liang, XIAO Zhong-liang. Model effects on progressive combustion property of layered propellant[J]. *Chinese Journal of Energetic Material(Hanneng Cailiao)*, 2011, 19(1): 69-73.

[9] 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 & Propellants*, 2006, 29(6): 65-68.

Numerical Calculation of Combustion Property for Seven-hole Variable Burning Rate Gun Propellant

LIU Ping, MA Zhong-liang, WANG Shuai-yu, CHAI Jun

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

Abstract: To simulate the combustion property of seven-hole variable burning rate gun propellant, a combustion model of seven-hole variable burning rate gun propellant was established. On the basis of the geometric combustion law, the function relation of combustion gas generation brisance(Γ) against the percentage of gun propellant burned (Ψ) was deduced. The Γ-Ψ curves were obtained by programming and calculation. The effects of burning rate ratio, inner pore diameter of the fast burning layer, length-to-diameter ratio and thickness of the slow burning layer on the combustion progressive property of seven-hole variable burning rate gun propellant were analyzed. Results show that the seven-hole variable burning rate gun propellant under the following conditions has better combustion progressive property: the burning rate ratio of the fast burning layer to slow burning layer in 1.5-2.5, length-to-diameter ratio ranging from 2 to 3, the thickness ratio of slow burning layer and fast burning layer in the range of 0.1-0.22, and the inner pore diameter of the fast buruing layer ranging from 0.2 mm to 0.3 mm.

Key words: seven-hole variable burning rate gun propellant; combustion property; numerical calculation

CLC number: TJ55; O69 **Document code**: A **DOI**: 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.03.008

www.energetic-materials.org.cn 含能材料