

文章编号:1006-9941(2020)06-0491-07

## 四孔长方体发射药的形状函数计算及燃烧性能

许征光<sup>1,2</sup>, 梁昊<sup>1,2</sup>, 丁亚军<sup>1,2</sup>, 肖忠良<sup>1,2</sup>, 李纯志<sup>3</sup>, 贺云<sup>3</sup>

(1. 南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094; 2. 南京理工大学特种能源材料教育部重点实验室, 江苏 南京 210094;

3. 泸州北方化学工业有限公司, 四川 泸州 646003)

**摘要:** 为研究四孔长方体发射药的燃烧性能,根据四孔长方体发射药的结构特征,建立四孔长方体发射药的燃烧物理模型,通过Maple软件得到其 $\Psi$ -Z、 $\Gamma$ - $\Psi$ 曲线。对比分析了相同弧厚及长宽比时,圆柱七孔发射药、圆柱单孔发射药与四孔长方体发射药的理论燃烧性能,同时研究了不同内外弧厚、长宽比及内孔径大小的四孔长方体发射药燃烧性能,并对其中的一种情况进行了实验验证。结果表明当长宽比大于1.5时,四孔长方体发射药具有良好地燃烧渐增性,且优于圆柱单孔发射药,劣于圆柱七孔发射药,但其分裂点相对于圆柱七孔发射药更加靠后;内外弧厚一致、长宽比为1.5~3、孔径为0.10~0.20 mm的四孔长方体发射药,具有相对较好的燃烧性能;实验结果能够较好地与理论分析结果相吻合,但由于发射药内孔位置的偏离以及尺寸一致性差,导致燃烧分裂点相比于理论计算要提前到达,因此可基于理论分析结果优化加工工艺,提高发射药的尺寸一致性及药孔分布的均匀性。

**关键词:** 四孔长方体发射药;形状函数;燃烧性能;数值计算

中图分类号: TJ55; TQ562

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2019253

### 1 引言

球扁药是目前我国中小口径轻武器的主要发射能源,其制作工艺简单、成熟、成本低,具有良好的流散性能,较高的装填密度,能够大大的提高弹丸的体积能量密度,但有一非常显著的缺点,燃烧减面性严重。减面性燃烧会使初始膛压骤高,从而使身管武器的质量增加,不利于武器的设计与使用<sup>[1]</sup>。为了使球扁药具有燃烧渐增性,目前主要采用钝感技术,在球扁药表面渗透一层钝感剂<sup>[2-5]</sup>。但钝感剂的使用会产生严重的烟、焰、残渣及污染环境等问题。将发射药做成多孔状是解决减面燃烧的有效方法之一。多孔发射药除了有从外表面向内层减面燃烧的过程之外,同时也还有从

内孔表面逐层向外层增面燃烧的过程,孔内燃面的增加超过孔外燃面的减少,这样使多孔火药表现出增面燃烧特性,并且由于增面燃烧阶段燃烧掉的发射药质量占总质量的绝大部分,因此克服了一般的减面燃烧造成的膛压突增骤减的不利现象<sup>[6]</sup>。

在单孔发射药的基础上加工成多孔,从而使发射药成为增面燃烧的发射药,目前多孔发射药主要有七孔、十四孔、十九孔及超多孔发射药<sup>[1]</sup>。程山<sup>[6]</sup>和刘平<sup>[7]</sup>在标准的七孔发射药外层包覆一层缓燃层,有效的结合了多孔发射药的燃烧渐增性和变燃速发射药的燃烧渐增性,进一步提高了七孔发射药的燃烧渐增性。粒装多孔发射药装填密度相对较低,为了提高多孔发射药的装填密度,文献[8]~[11]出了一种含有环切口大长径比的杆状多孔发射药,此类发射药不仅具有良好的燃烧渐增性,而且还具有较高的装填密度<sup>[8-11]</sup>。多孔发射药虽然拥有良好的燃烧渐增性,但其尺寸较大,一般不适用于中小口径武器,其装填密度也相对较小。

球扁药燃烧减面性严重、尺寸一致性差和一般多孔发射药相对尺寸较大、装填密度小、不适于中小口径武器。四孔长方体发射药理论上不仅拥有一般多孔发射药燃烧渐增性的优点,也有小尺寸发射药装填密度

收稿日期: 2019-09-26; 修回日期: 2019-10-31

网络出版日期: 2020-01-02

基金项目: 特种能源材料教育部重点实验室(南京理工大学)开放基金项目资助(2019SEM05); 国防科技重点实验室基金项目资助(6142603190210)

作者简介: 许征光(1991-),男,硕士研究生,主要从事发射药研究。e-mail: 594781978@qq.com

通信联系人: 丁亚军(1990-),男,讲师,主要从事发射药研究。e-mail: dyj@njust.edu.cn

引用本文: 许征光, 梁昊, 丁亚军, 等. 四孔长方体发射药的形状函数计算及燃烧性能[J]. 含能材料, 2020, 28(6):491-497.

XU Zheng-guang, LIANG Hao, DING Ya-jun, et al. Calculation of Shape Function and Combustion Performance of Four-hole Cuboid Gun Propellant[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2020, 28(6):491-497.

高的优点,且其尺寸一致性较球扁药更易控制。本研究提出了一种小尺寸、长方体的四孔发射药,为了解四孔长方体发射药燃烧性能及燃烧渐增性的影响因素,建立了四孔长方体发射药的燃烧模型,通过数值模拟计算,分析了各影响因素对四孔长方体发射药燃烧渐增性的影响,旨在为四孔长方体发射药的燃烧性能研究提供理论支持。

## 2 四孔长方体发射药燃烧模型的建立

### 2.1 形状函数计算的基本假设前提

四孔长方体发射药结构示意图如图1所示,其横截面尺寸参数图如图2所示。

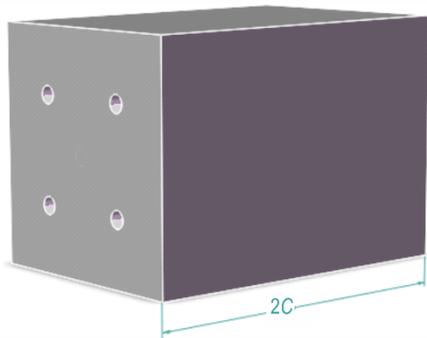


图1 四孔长方体发射药结构图

Fig.1 Schematic structure of four-hole cuboid gun propellant

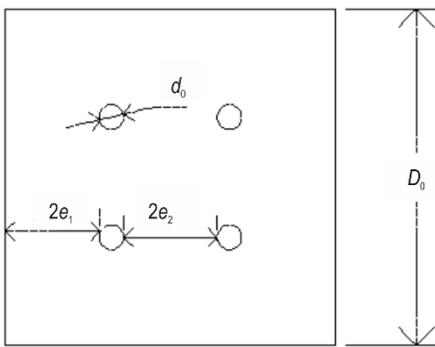


图2 四孔长方体发射药横截面尺寸图

Fig.2 Cross-sectional size of four-hole cuboid gun propellant

为简化计算,做出如下假设<sup>[1,6-7]</sup>:

- (1) 发射药气体的流动是零维、无黏性和可压缩的;
- (2) 发射药燃烧服从几何燃烧定律,在  $t=0$  时刻,所有药粒同时着火;
- (3) 发射药燃气组分相同,气相的状态服从 No-ble-Abel 状态方程;
- (4) 发射药颗粒的形状、尺寸均匀一致;
- (5) 发射药颗粒具有不可压缩性,具有固定密度;
- (6) 药粒宽为  $D_0$ , mm; 药粒孔径为  $d_0$ , mm; 药粒

长度为  $2c$ , mm; 长宽比为  $k=2c/D_0$ , 孔数目为  $n$ , 已燃厚度为  $e$ , mm; 药粒外弧厚为  $2e_1$ , mm;  $Z=2e/2e_1$  为已燃药厚与初始药弧厚的比值,药粒内弧厚为  $2e_2$ , mm; 推导以内外弧厚一致为前提,即  $e_1=e_2$ 。

### 2.2 四孔长方体发射药形状函数的推导

由经典内弹道理论,并参考多孔发射药形状函数的推导,结合四孔长方体发射药的燃烧特点,根据已建立的四孔长方体发射药燃烧的物理模型,把四孔长方体发射药的燃烧分为二个阶段:

第一阶段:发射药药粒燃烧分裂前阶段( $0 < Z < 1$ )。此阶段除了有从外表面向内表面减面燃烧的过程之外,同时也还有从孔内表面逐层向外表面增面燃烧的过程,孔内燃烧面的增加速率超过孔外燃烧面的降低速率,这个阶段主要呈现出增面燃烧。

设发射药分裂前的形状函数为<sup>[1]</sup>:

$$\Psi_1 = \chi Z (1 + \lambda Z + \mu Z^2) \tag{1}$$

其发射药形状特征量普遍形式为:

$$\left. \begin{aligned} \chi &= \frac{Q_1 + 2\Pi_1}{Q_1} \cdot \beta \\ \lambda &= \frac{n - 1 - 2\Pi_1}{Q_1 + 2\Pi_1} \cdot \beta \\ \mu &= -\frac{(n - 1)\beta^2}{Q_1 + 2\Pi_1} \end{aligned} \right\} \tag{2}$$

式中:

$$\left. \begin{aligned} \Pi_1 &= \frac{L}{2\pi c} \\ Q_1 &= \frac{S_T}{\pi c^2} \\ \beta &= \frac{2e_1}{2c} \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

联立(1)、(2)、(3)可得:

$$\Psi_1 = \left( 1 + \frac{4D_0c + 4\pi d_0c}{D_0^2 - \pi d_0^2} \right) \cdot \frac{Ze_1}{c} + \frac{3\pi c - 4D_0 - 4\pi d_0}{D_0^2 - \pi d_0^2} \cdot \frac{Z^2e_1^2}{c} - \frac{3\pi}{D_0^2 - \pi d_0^2} \cdot \frac{Z^3e_1^3}{c} \quad (0 < Z < 1) \tag{4}$$

式中,  $\Psi_1$  为第一阶段的相对燃烧体积分;  $\chi$ 、 $\lambda$  及  $\mu$  是发射药第一阶段的形状特征量;  $\Pi_1$  为药粒圆周长和以药粒长  $2c$  为直径的圆周长之比;  $Q_1$  为药粒端面积和以药粒长  $2c$  为直径的圆面积之比。

第二阶段:发射药药粒燃烧分裂后阶段

( $1 \leq Z < (e_1 + \rho)/e_1$ )。此阶段发射药药粒断面如图 3 所示, 分裂成四个小号曲边三角形碎粒和四个中号曲边三角形碎粒及一个大的曲边四角形碎粒, 分别取其断面的内切圆, 设  $\alpha_1$  为小号碎粒端面面积占碎粒端面总面积的比值;  $\alpha_2$  为中号碎粒端面面积占碎粒端面总面积的比值;  $\alpha_3$  为小号碎粒端面面积占碎粒端面总面积的比值;  $\rho_1$  为小号碎粒端面的内切圆半径;  $\rho_2$  为中号碎粒端面的内切圆半径;  $\rho_3$  为小号碎粒端面的内切圆半径;  $\rho$  为碎粒端面的加权平均半径; 由于未燃部分占有量的很少, 所以可以把分裂碎粒按单一几何形状进行处理, 近似取其加权平均半径进行计算。

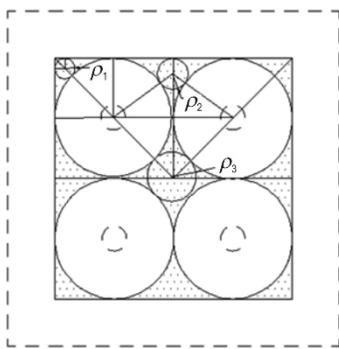


图 3 燃烧分裂时四孔长方体发射药碎粒断面图  
Fig. 3 Cross-sectional size of four-hole cuboid propellant granules during combustion splitting

由图 3 可知, 小号碎粒断面内切圆半径计算公式为:

$$(\sqrt{2} - 1)\left(\frac{d_0}{2} + e_1\right) = \rho_1 + \sqrt{2} \rho_1 \quad (5)$$

$$\rho_1 = (3 - 2\sqrt{2})\left(\frac{d_0}{2} + e_1\right) \quad (6)$$

中号碎粒断面内切圆半径的计算公式为:

$$\left(\frac{d_0}{2} + e_1\right) = \rho_2 + \sqrt{\left(\frac{d_0}{2} + e_1 + \rho_2\right)^2 - \left(\frac{d_0}{2} + e_1\right)^2} \quad (7)$$

$$\rho_2 = \frac{1}{4}\left(\frac{d_0}{2} + e_1\right) \quad (8)$$

大号碎粒断面内切圆半径的计算公式为:

$$2\left(\frac{d_0}{2} + e_1 + \rho_3\right)^2 = (d_0 + 2e_1)^2 \quad (9)$$

$$\rho_3 = (\sqrt{2} - 1)\left(\frac{d_0}{2} + e_1\right) \quad (10)$$

由图 3 可看出断面总面积可以划分成 16 份小碎粒断面面积, 小碎粒断面总面积占 4 份, 中碎粒断面总面积占 8 份, 大号碎粒断面总面积占 4 份, 则  $\alpha_1=1/4$ 、 $\alpha_2=1/2$ 、 $\alpha_3=1/4$ 。

其加权平均半径计算公式为:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\alpha_1}{\rho_1} + \frac{\alpha_2}{\rho_2} + \frac{\alpha_3}{\rho_3} \quad (11)$$

$$\rho = 0.2463\left(\frac{d_0}{2} + e_1\right) \quad (12)$$

设四孔长方体发射药分裂后的形状函数为:

$$\Psi_2 = \chi_s Z (1 + \lambda_s Z) \quad (13)$$

式中:

$$\left. \begin{aligned} \chi_s &= \frac{1 - \Psi_s Z_b^2}{Z_b - Z_b^2} \\ \lambda_s &= \frac{\Psi_s}{\chi_s} - 1 \\ Z_b &= \frac{e_1 + \rho}{e_1} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

联立(12)、(13)、(14)可得:

$$\Psi_2 = \frac{\Psi_s \left[ e_1 + 0.2463\left(\frac{d_0}{2} + e_1\right) \right]^2 - e_1^2}{\left[ 0.2463\left(\frac{d_0}{2} + e_1\right) \right]^2 + e_1 \cdot 0.2463\left(\frac{d_0}{2} + e_1\right)} \cdot (Z - Z^2) + \Psi_s \cdot Z^2 \left( 1 < Z < (e_1 + \rho)/e_1 \right) \quad (15)$$

式中,  $\Psi_2$  为第二阶段的相对燃烧体积分,  $\Psi_s$  为  $Z=1$  时的  $\Psi$  值,  $\chi_s$  和  $\lambda_s$  分别为第二阶段的形状特征量。

### 2.3 发射药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  $\Gamma = \frac{1}{p} \frac{d\Psi}{dt}$ ,

根据发射药的燃速方程  $u = \frac{de}{dt} = \frac{e_1 dZ}{dt} = u_1 \rho^n$ , 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:

$$\Gamma = \frac{1}{p} \frac{d\Psi}{dZ} \frac{dZ}{dt} = \frac{u_1}{p} \frac{d\Psi}{dZ} \quad (16)$$

第一阶段 ( $0 < Z < 1$ ):

$$\Gamma_1 = u_1 \left[ \left( 1 + \frac{4D_0 c + 4\pi d_0 c}{D_0^2 - \pi d_0^2} \right) \cdot \frac{1}{c} + \frac{3\pi c - 4D_0 - 4\pi d_0}{D_0^2 - \pi d_0^2} \cdot \frac{2Ze_1}{c} - \frac{3\pi}{D_0^2 - \pi d_0^2} \cdot \frac{3Z^2 e_1^2}{c} \right] \quad (17)$$

式中  $\Gamma_1$  为第一阶段发射药的燃气生成猛度,  $\text{MPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $u_1$  为燃速系数,  $\text{m} \cdot \text{MPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

第二阶段( $1 < Z < (e_1 + \rho/e_1)$ ):

$$\Gamma_2 = u_1 \frac{\Psi_s \left( e_1 + 0.2463 \left( \frac{d_0}{2} + e_1 \right) \right)^2 - e_1^2}{\left[ 0.2463 \left( \frac{d_0}{2} + e_1 \right) \right]^2 + e_1 \cdot 0.2463 \left( \frac{d_0}{2} + e_1 \right)} \cdot \left( \frac{1}{e_1} - \frac{2Ze_1}{e_1^2} \right) + u_1 \Psi_s \cdot \frac{2Ze_1}{e_1^2} \quad (18)$$

式中,  $\Gamma_2$  为第二阶段发射药的燃气生成猛度,  $\text{MPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。将计算得到的公式输入到 Maple 软件计算做出不同条件的四孔长方体发射药  $\Psi$ - $Z$ 、 $\Gamma$ - $\Psi$  曲线。

### 3 四孔长方体发射药燃烧性能的理论分析

#### 3.1 四孔长方体发射药与圆柱七孔发射药、圆柱单孔发射药燃烧性能的对比分析

由经典内弹道理论<sup>[1]</sup>, 推导出圆柱七孔发射药及圆柱单孔发射药的形状函数, 取与四孔长方体发射药相同的长宽比、孔径及弧厚, 对比分析三者的燃烧性能, 长宽比为 2, 孔径为 0.14 mm, 弧厚为 0.27 mm。

三者的  $\Psi$ - $Z$  曲线如图 4 所示, 由图 4 可知, 圆柱单孔发射药的相对燃烧体积分数随已燃弧厚与初始弧厚之比的增大而增大, 整体增长趋势保持不变; 四孔长方体发射药与圆柱七孔发射药的相对燃烧体积分数随已燃弧厚与初始燃烧弧厚之比的增大而增大, 在分裂点处, 增长趋势开始减缓, 并且四孔长方体发射药比圆柱七孔发射药相对燃烧体积分数大。

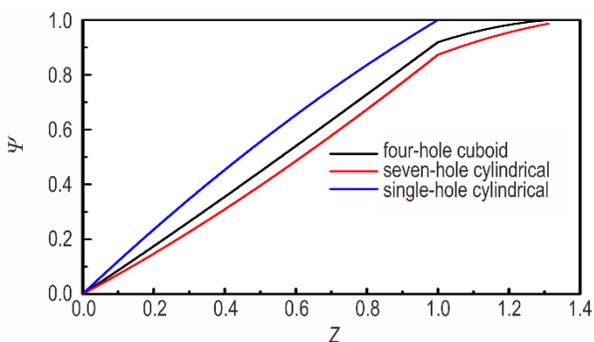


图 4 四孔长方体发射药、圆柱七孔发射药及圆柱单孔发射药的  $\Psi$ - $Z$  曲线

Fig.4  $\Psi$ - $Z$  curves of four-hole cuboid, seven-hole cylindrical and single-hole cylindrical gun propellants

三者的  $\Gamma$ - $\Psi$  曲线如图 5 所示。由图 5 可知, 圆柱单孔发射药的燃烧猛度随着燃烧体积分数的增大而减小, 表现出明显的燃烧渐减性, 这是由于单孔发射药孔内燃烧面增加的速度小于孔外的燃烧面减少的速度, 所以整体表现出减面燃烧; 圆柱七孔发射药和四孔长方体发射

药在分裂点之前燃烧猛度随着燃烧体积分数的增大而增大, 表现出明显的增面性, 这是由于两者的孔内燃烧面增加的速度大于孔外燃烧面减小的速度; 圆柱七孔发射药的燃烧猛度增加速度大于四孔长方体发射药的燃烧猛度增加速度, 这是由于发射药孔数目越多, 孔内燃烧面的增加速度越快; 对比四孔长方体发射药与圆柱七孔发射药, 虽然理论上发射药孔数目越多, 燃烧渐增性越好, 但随着孔数目的增加, 发射药的粒径随之增大, 装填密度也相对减小, 并且到达分裂点时, 孔数目越多, 其燃烧体积分数也越小, 分裂点相对更加靠前。

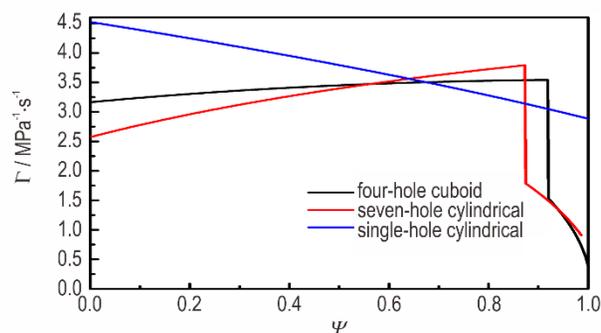


图 5 四孔长方体发射药、圆柱七孔发射药及圆柱单孔发射药的  $\Gamma$ - $\Psi$  曲线

Fig.5  $\Gamma$ - $\Psi$  curves of four-hole cuboid, seven-hole cylindrical and single-hole cylindrical gun propellants

#### 3.2 内外弧厚差异对四孔长方体发射药燃烧过程的影响

按照四孔长方体发射药的药形设计, 四个孔分布在正方形的对角线上, 为方便计算, 分别取内弧厚等于外弧厚 1.5 倍时、内弧厚与外弧厚相同时及外弧厚是内弧厚的 1.5 倍时的三种情况, 如图 6、图 7、图 8 分别为三种情况下四孔长方体发射药燃烧至分裂点的截面示意图。在燃烧到达分裂时, 第一种情况的发射药燃烧掉的体积分数为 66%, 有 34% 的发射药将在减面燃烧阶段燃去, 第二种情况的发射药燃烧掉的体积分数为 90.4%, 有 9.6% 的发射药将在减面燃烧阶段燃去, 第三种情况的发射药燃烧掉的体积分数为 77.6%, 有 22.4% 的发射药将在减面燃烧阶段燃去。经过对比分析, 我们发现无论是内弧厚大于外弧厚发射药, 还是外弧厚大于内弧厚发射药, 都比内外弧厚一致的发射药提前到达分裂点, 所以理论上应该将四孔长方体发射药做成内外弧厚一致。

#### 3.3 长宽比对四孔长方体发射药燃烧渐增性的影响

保持内外弧厚及药粒孔径一致, 分别取不同的长宽比进行计算。选取长宽比  $k=0.75$ 、1.0、1.5、2.0、

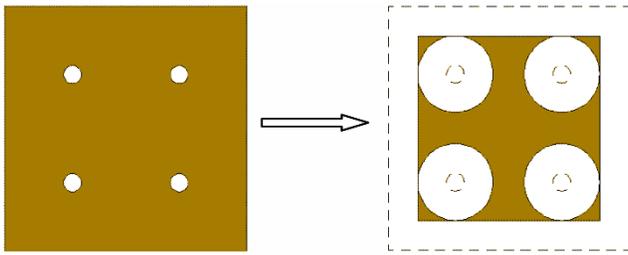


图6 四孔长方体发射药的燃烧截面图( $1.5e_1=e_2$ )

Fig.6 Cross-section of four-hole cuboid gun propellant ( $1.5e_1=e_2$ )

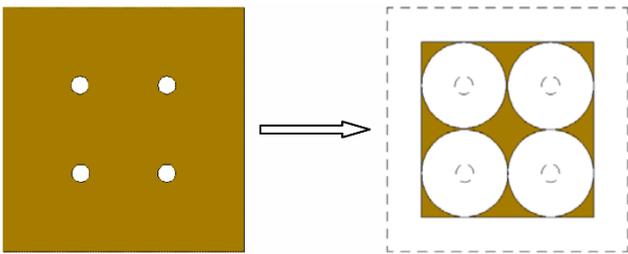


图7 四孔长方体发射药的燃烧截面图( $e_1=e_2$ )

Fig.7 Cross-section of four-hole cuboid gun propellant( $e_1=e_2$ )

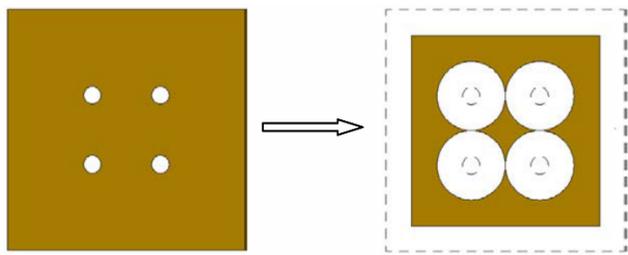


图8 四孔长方体发射药的燃烧截面图( $e_1=1.5e_2$ )

Fig.8 Cross-section of four-hole cuboid gun propellant ( $e_1=1.5e_2$ )

3.0进行模拟计算,对应的内外弧厚为0.54 mm,药粒孔径为0.14 mm,药粒宽为1.9 mm。

图9为四孔长方体发射药不同长宽比时 $\Psi$ -Z曲线。由图9可知,相对燃烧体积分数随已燃弧厚与初始燃烧弧厚之比的增大而增大,在分裂点时开始减缓;燃烧至同一厚度比时,相对燃烧体积分数随长宽比的增大而减小,这是因为相同燃烧厚度比时,长宽比值越大,两端燃烧体积占初始体积的比值越小,致使相对燃烧体积分数也越小。

图10为四孔长方体发射药不同长宽比时 $\Gamma$ - $\Psi$ 曲线。由图10可知,存在一个临界长宽比 $k=1.5$ ,当 $k < 1.5$ 时,燃气生成猛度都为下降的趋势,并且下降趋势随着长宽比的减小而加剧;当 $k > 1.5$ 时,燃气生成猛度前期呈上升趋势,且随着长宽比的增大,上升趋势越明显。这是由于多孔发射药燃烧过程中,不仅有孔内燃烧面的增加,还有孔外及两端燃烧面的减少,当

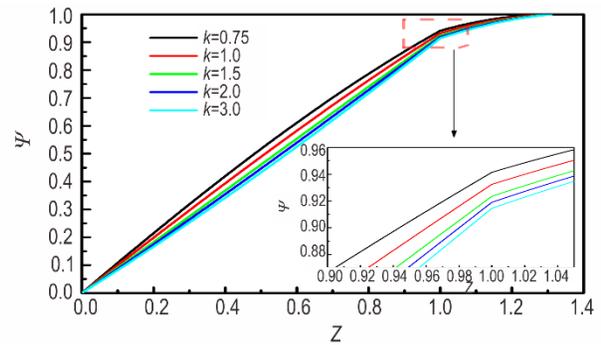


图9 四孔长方体发射药不同长宽比时 $\Psi$ -Z曲线

Fig.9  $\Psi$ -Z curves of four-hole cuboid gun propellant with different length-to-width ratios

长宽比越小,端面燃烧的影响也越大,端面减面燃烧占有比重也越大,当长宽比小于某一临界值时,减面燃烧占主导,表现出减面性燃烧。

在理论情况下,四孔长方体发射药的长宽比越大,其燃烧渐增性越好,但长宽比较大时,在点火时其内孔不能和外表面同时被点燃,此外因孔道狭窄排气不畅可能出现侵蚀燃烧;而且长宽比越大,其对应分裂点的已燃百分数越小,发射药的装填密度也越小。因此在满足燃烧性能的条件下,应缩短长宽比以提高发射药的装填密度,综合考虑 $k=1.5\sim 3.0$ 。

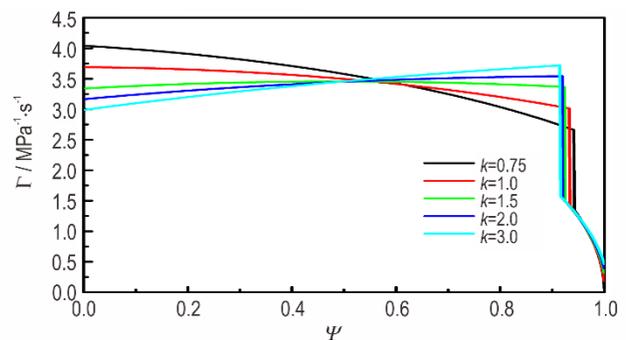


图10 四孔长方体发射药不同长宽比时 $\Gamma$ - $\Psi$ 曲线

Fig.10  $\Gamma$ - $\Psi$  curves of four-hole cuboid gun propellant with different length-to-width ratios

### 3.4 内孔径对四孔长方体发射药燃烧渐增性的影响

保持内外弧厚及长宽比一致,改变四孔长方体发射药药粒孔径,分别取0.10、0.14、0.20、0.25 mm和0.30 mm进行模拟计算,对应的内外弧厚为0.54 mm,长宽比为2,药粒宽为1.9 mm。

图11为发射药不同孔径时 $\Psi$ -Z曲线。由图11可知,相对燃烧质量分数随已燃弧厚与初始燃烧弧厚之比的增大而增大,在分裂点时开始减缓;当孔径由0.1 mm增加到0.30 mm时,其分裂点的相对燃烧质量分数随着孔径的增大而减小。

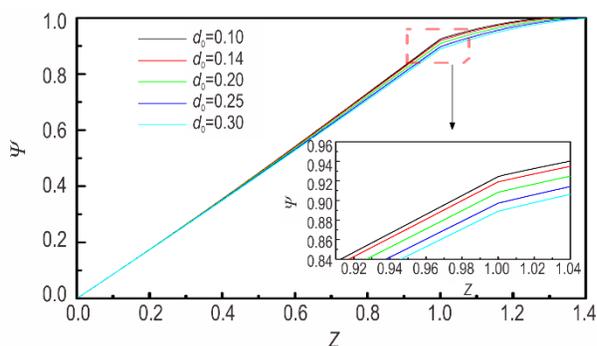


图11 四孔长方体发射药不同孔径时 $\Psi$ - $Z$ 曲线

Fig.11  $\Gamma$ - $\Psi$  curves of four-hole cuboid gun propellant with different pore diameters

图12为四孔长方体发射药不同孔径时 $\Gamma$ - $\Psi$ 曲线。由图12可知,当四孔长方体发射药的孔径不同时,表现出相近的变化趋势。在分裂点前,气体生成猛度随相对燃烧质量分数的增大而增大,表现出明显的增面燃烧,在分裂点之后,气体生成猛度随相对燃烧质量分数的增大而减小,表现出明显的减面燃烧;当孔径由0.10 mm增加到0.30 mm时,气体生成猛度随着孔径的增大而增大,但其燃烧分裂点随之减小。

理论情况下,四孔长方体发射药的孔径越小,其燃烧分裂点越靠后,但孔径较小时,容易造成堵孔现象,增加加工难度。因此考虑到实际情况下孔径的值也不能太小,一般取0.1~0.2 mm。

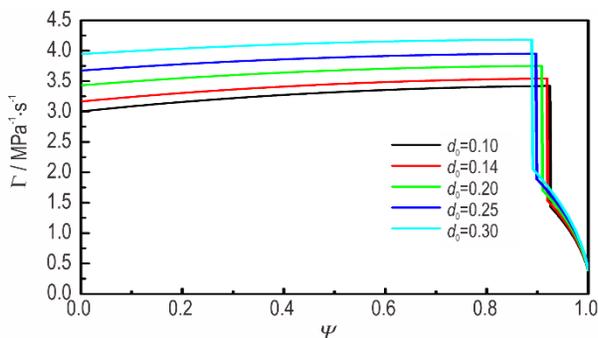


图12 四孔长方体发射药不同孔径时 $\Gamma$ - $\Psi$ 曲线

Fig.12  $\Gamma$ - $\Psi$  curves of four-hole cuboid gun propellant with different pore diameters

## 4 四孔长方体发射药制备及燃烧性能

### 4.1 制备方法

以某双基发射药为例,采用半溶剂法工艺压制成四孔长方体发射药。四孔长方体发射药药型参数:药粒长1.90 mm,内径0.14 mm,外径1.90 mm,内外弧厚0.54 mm;球扁药弧厚0.38 mm。

### 4.2 测试方法

密闭爆发器容积50 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。按照GJB770B-2005 703.1密闭爆发器试验方法测试四孔长方体发射药和球扁药的静态燃烧性能。

### 4.3 燃烧性能结果分析

图13为密爆实验处理得到的四孔长方体发射药与球扁药的 $L$ - $B$ 曲线图。由图13可以看出,在 $0.2 < B < 0.75$ ,四孔长方体发射药的动态活度基本保持缓慢下降趋势,在 $B=0.75$ 之后才表现出明显的递减趋势,而球扁药整体呈现出明显的递减趋势,表现出明显的燃烧渐减性;四孔长方体发射药实际燃烧趋势与理论分析的图10中 $k=1.0$ 的曲线趋势整体吻合较好,但发射药实际燃烧提前到达分裂点,与理论分析有一定的偏差,分析主要原因是发射药偏孔比较严重,如同图6、图8所示的燃烧过程,由于偏孔导致内外弧厚偏差较大,致使燃烧分裂点提前到达;另外发射药的尺寸一致性较差,致使发射药提前到达燃烧分裂点。

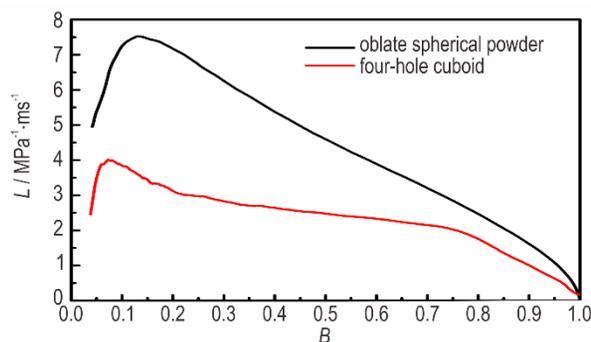


图13 四孔长方体发射药和球扁药的 $L$ - $B$ 曲线

Fig.13  $L$ - $B$  curves of four-hole cuboid gun propellant and oblate spherical powder

## 5 结论

(1) 四孔长方体发射药比单孔发射药具有较好的渐增性,比圆柱七孔发射药具有相对更加靠后的分裂点,当长宽比大于1.5时,具有良好的燃烧渐增性。

(2) 四孔长方体发射药内外弧厚保持一致,长宽比取1.5~3.0,孔径取0.1~0.2 mm,表现出的燃烧性能较好。

(3) 实际燃烧趋势与理论分析吻合较好,但提前到达分裂点,分析主要原因有四孔长方体发射药偏孔比较严重及尺寸一致性较差,所以要优化加工工艺,提高发射药的尺寸一致性及药孔分布的均匀性。

## 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] 王泽山, 何卫东. 火药装药设计原理与技术[M]. 北京理工大学出版社, 2006.  
WANG Ze-shan, HE Wei-dong. Design principle and technique of powder charge[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006.
- [3] 肖正刚, 应三九, 徐复铭. 深钝感球扁药发射装药膛内实际燃烧规律[J]. 兵工学报, 2001, 22(2): 161-164.  
XIAO Zheng-gang, YING San-jiu, XU Fu-ming. Rules of combustion of deep-deterred oblate spherical powder propelling charge in the bore[J]. *Acta Armamentarii*, 2001, 22(2): 161-164.
- [4] 肖正刚, 施杰, 应三九, 等. 大弧厚深钝感球扁药的定容燃烧性能[J]. 弹道学报, 2000, 12(2): 6-9.  
XIAO Zheng-gang, SHI Jie, YING San-jiu, et al. The isovolumetric burning performance of deep-deterred oblate spherical powder with large web[J]. *Journal of Ballistics*, 2000, 12(2): 6-9.
- [5] 肖正刚, 周伟良, 应三九, 等. 球扁药应用于大口径火炮高装填密度发射装药[J]. 火炸药学报, 1999, 22(4): 36-38.  
XIAO Zheng-gang, ZHOU Wei-liang, YING San-jiu, et al. The application of oblate spherical powder to high loading density gun propellant charge [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 1999, 22(4): 36-38.
- [6] 程山, 马忠亮, 代淑兰, 等. 七孔变燃速发射药内弹道性能的数值计算[J]. 火炸药学报, 2014, 37(2): 78-81.  
CHENG Shan, MA Zhong-liang, DAI Shu-lan, et al. Numerical calculation of the interior ballistic performances of the 7-perforation gun propellant with variable burning rate[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2014, 37(2): 78-81.
- [7] 刘平, 马忠亮, 王率宇, 等. 七孔变燃速发射药燃烧性能的数值计算[J]. 含能材料, 2015, 23(3): 243-247.  
LIU Ping, MA Zhong-liang, WANG Shuai-yu, et al. Numerical calculation of combustion property for seven-hole variable burning rate gun propellant [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2015, 23(3): 243-247.
- [8] Ruth C R, Robbins F W, Minor T C, et al. A new high-progression/high-density propulsion concept: partially cut multiperforated stick propellant[R]. AD BRL-TR-3189: 1991.
- [9] 徐汉涛, 肖正刚, 何卫东. 部分切口多孔杆状发射药的燃烧性能[J]. 含能材料, 2014, 22(2): 251-255.  
XU Han-tao, XIAO Zheng-gang, HE Wei-dong. Combustion characteristics of partially cut multiperforated stick propellant[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2014, 22(2): 251-255.
- [10] Ermolaev B S, Romankov A V, Sulimov A A, et al. Compact-modified propellant blocks as traveling charge in the hybrid shot scheme[J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2014, 39(6): 881-889.
- [11] 王锋, 李梓超, 刘国涛, 等. 多孔环切杆状发射药的燃烧性能[J]. 火炸药学报, 2015, 38(2): 89-92.  
WANG Feng, LI Xin-chao, LIU Guo-tao, et al. Combustion performances of multi-perforated curve-cut stick gun propellants [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2015, 38(2): 89-92.

## Calculation of Shape Function and Combustion Performance of Four-hole Cuboid Gun Propellant

XU Zheng-guang<sup>1,2</sup>, LIANG Hao<sup>1,2</sup>, DING Ya-jun<sup>1,2</sup>, XIAO Zhong-liang<sup>1,2</sup>, LI Chun-zhi<sup>3</sup>, HE Yun<sup>3</sup>

(1. School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Key Laboratory of Special Energy Materials (Nanjing University of Science and Technology), Ministry of Education, Nanjing 210094, China; 3. Luzhou North Chemical Industry Co., Ltd., Luzhou 646003, China)

**Abstract:** In order to investigate the combustion performance of four-hole cuboid gun propellants, a combustion physical model was established according to the structural characteristics of four-hole cuboid gun propellants. The  $\Psi$ -Z and  $\Gamma$ - $\Psi$  curves were obtained through the Maple software. The theoretical combustion properties of four-hole cuboid gun propellants were compared with that of the cylindrical seven-hole and single-hole gun propellants under the same web size and length-to-diameter ratio. Meanwhile, the web size, length-to-diameter ratio and inner-hole diameter were researched as the main factors to the theoretical combustion properties. The results demonstrated that the four-hole cuboid gun propellant performed a good progressive combustion property when the length-to-diameter ratio was higher than 1.5, which was better than the cylindrical single-hole gun propellants. Although the four-hole cuboid gun propellant performed a worse combustion property than the cylindrical seven-hole gun propellant, it displayed the combustion split points in the latter point. Meanwhile, the four-hole cuboid gun propellant had a better progressive combustion property when the inner web size was the same as the outer, the length-to-diameter ratio was in the range from 1.5 to 3, and the inner-hole diameter was in the range from 0.10 mm to 0.20 mm. The experimental results agreed well with the theoretical analysis results, but the moulding process led to the certain deviation of inner hole, resulting in the splitting point reached in advance.

**Key words:** four-hole cuboid gun propellant; shape function; combustion property; numerical calculation

**CLC number:** TJ55; TQ562

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2019253

(责编: 姜梅)