

文章编号:1006-9941(2022)12-1219-07

# 预制刻槽增面燃烧发射药的原理与实验验证

张延康<sup>1</sup>,肖忠良<sup>1,2</sup>,刘 详<sup>3</sup>,张华君<sup>3</sup>,李世影<sup>2</sup>,林照强<sup>3</sup>

(1. 中北大学环境与安全工程学院, 山西 太原 030051; 2. 南京理工大学化工学院, 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:** 为获得发射药能量释放渐增性及其多维度调节控制方法,根据内弹道学原理,提出预制刻槽增面燃烧发射药,建立了其燃烧过程的物理、数学模型,推导了气体生成速度-已燃质量分数( $\Gamma-\Psi$ )关系,论述了其能量释放渐增性及多维度调节控制原理,提出了预制刻槽发射药的工艺实现方法。设计了一种中心开孔式预制刻槽发射药结构,制备了不同刻槽数、不同长径比的发射药试样。采用密闭爆发器试验对其燃烧性能进行测试与表征,并与七孔发射药、七孔包覆药进行对比分析。试验结果表明:制备的预制刻槽发射药具有理论设计的燃烧渐增性,对比七孔发射药其动态活度增量 $\Delta L$ 值提高了2倍,最大动态活度与起始动态活度的比值 $L_m/L_0$ 提高了24.4%,最大动态活度对应的相对压力值 $B_m$ 增加了32.4%,燃烧渐增性优于七孔发射药,可以达到七孔包覆药的渐增效果。

**关键词:** 固体发射药;预制刻槽;药型设计;燃烧性能;燃面渐增性

中图分类号: TJ55;TQ 562

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2022128

## 0 引言

高初速、高威力是身管武器追求的主要目标。枪炮内弹道学及火药装药学表明,采用燃烧渐增性发射药是实现最大膛压不变条件下增加弹丸初速的有效方式。火药燃烧渐增性通常有2个实现途径:一是以化学组分变化来调节药体燃速,达到燃速渐增性燃烧效果。二是使火药燃烧的燃烧面积逐渐增加,达到燃面渐增性效果<sup>[1-3]</sup>。燃速渐增性发射药结构与装药方法较为丰富,例如表面钝感、包覆发射药、变燃速发射药、梯度硝基发射药等<sup>[4-7]</sup>。应用广泛的燃面渐增性发射药主要是多孔发射药,孔数越多渐增性越好,同时工艺实现难度越大,相应的发射药尺寸也越大,例如19孔、37孔药通常适用于大口径武器平台<sup>[8-9]</sup>。广泛使用的七孔发射药因尺寸较小、相对误差大等因素,导致其实际燃烧过程一般呈现近似恒面甚至是减面燃烧<sup>[10]</sup>,需

要经过包覆、钝感等后处理才能获得较好的燃烧渐增性。但这些处理方式也带来了小分子钝感剂迁移<sup>[11-13]</sup>、“惰性”组分降低氧平衡加剧炮口烟焰<sup>[14]</sup>、引入不含能或低能量功能组分造成能量损失等问题。

针对上述现有燃面渐增性发射药在应用中存在的不足,基于内弹道理论提出了预制刻槽增面燃烧发射药的概念。建立了该种发射药燃烧过程的物理、数学模型,论述了能量释放渐增性原理及多维度调节控制方法,提出了预制刻槽发射药的工艺实现方法。采用密闭爆发器试验验证了预制刻槽发射药的能量释放渐增性,且在改善燃烧性能的同时避免了引入钝感剂带来的问题。

## 1 概念及制备方法

### 1.1 预制刻槽增面燃烧发射药的概念

在设计与制备发射药时,在发射药内部按照一定规律预制若干刻槽结构,使得这些刻槽在发射药燃烧时由闭合状态逐渐打开,火药内部燃烧面积随之持续大幅度增加,从而获得较好的燃烧渐增性,将此类发射药称为预制刻槽(增面燃烧)发射药。该类发射药概念的核心在于,通过引入刻槽结构,使得燃面持续增加,获得燃烧渐增性;同时通过调节刻槽结构,在一定程度

收稿日期:2022-05-12;修回日期:2022-07-13

网络出版日期:2022-09-27

作者简介:张延康(1993-),男,博士研究生,主要从事发射药及装药研究。e-mail:zhangyankang541@163.com

通信联系人:肖忠良(1957-),男,教授,博士生导师,主要从事发射药及装药研究。e-mail:xzlj@njust.edu.cn

引用本文:张延康,肖忠良,刘详,等.预制刻槽增面燃烧发射药的原理与实验验证[J].含能材料,2022,30(12):1219-1225.

ZHANG Yan-kang, XIAO Zhong-liang, LIU Xiang, et al. Principle and Control Method of Pre-grooved Gun Propellant with Progressive Combustion Feature[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2022, 30(12):1219-1225.

上实现能量释放规律控制。图1a为预制6个刻槽的中心开孔式发射药截面结构示意图,虚线代表刻槽位置,图1c为相应的实物图。理论上讲,其燃烧渐增性来源于预制刻槽结构的逐渐打开与扩展,因此这种发射药外形并不局限于常见的圆柱状、片状等形状,只要刻槽排布合理,根据武器平台装药需求调整药型同样是可行的。

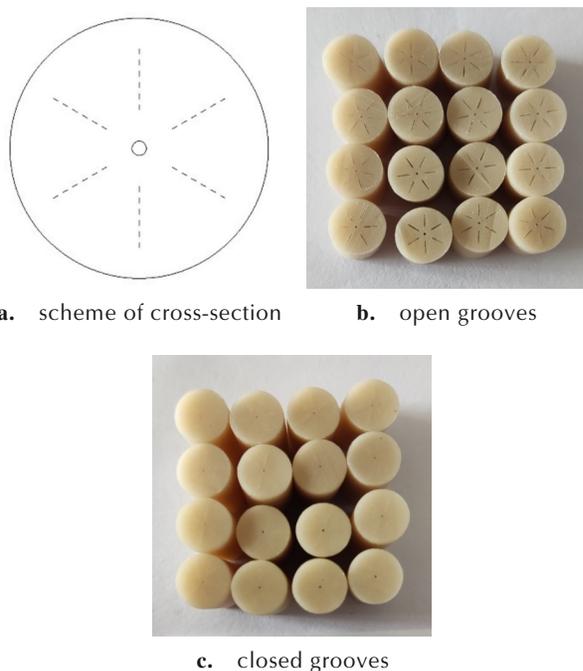


图1 预制刻槽发射药截面示意图与实物图  
Fig. 1 Cross-sectional schematic and photographs of pre-grooved gun propellants with different structures

## 1.2 制备方法

预制刻槽发射药的制备流程及工艺与一般溶剂法挤压制备的发射药没有实质区别,都包括原材料塑化、挤压成型、晾药、切药等基本流程。因其本质是一种新的药型结构设计,对原材料及配方无特殊要求。预制刻槽发射药的结构、尺寸由专用模具控制,图2为模具结构示意图。模具由模套、针架、若干片针、一根圆针构成。发射药内径由圆针直径控制,发射药外径由模套成型段内径控制。预制刻槽尺寸由片针结构控制,刻槽分布位置由针架结构控制。预制刻槽开合状态由片针长度调控,片针与模套成型段长度平齐,则制成图1b中所示刻槽开启的发射药,这种结构的发射药需经过封端才能有较好的燃烧渐增性。将片针缩短一定长度,物料在模套成型段被再次压缩,刻槽收紧,制成如图1c所示刻槽呈闭合状态的发射药。这些闭合的刻槽,在燃烧时逐渐打开,带来增面效应。预制刻槽发射药制备过程无需包覆、钝感等后处理工序,缩短了制

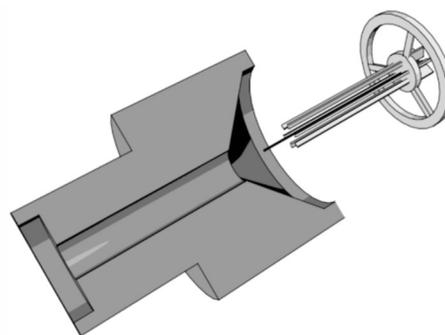


图2 模具结构示意图  
Fig.2 Schematic of the extrusion mould for preparation of the pre-grooved gun propellant

备周期,工艺简洁;该制备方法无需对现有制式产品生产线作大幅改动,只是更换成型单体即可实现发射药结构和燃烧性能的改变,具有实践上的可行性。

## 2 原理论证

由内弹道理论和发射药的燃烧规律<sup>[2]</sup>可知,发射药实时燃烧的质量速率计为

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{s}{\Lambda_0} \cdot \frac{de}{dt} \quad (1)$$

式中, $s$ 为实时燃烧面积, $\text{cm}^2$ ;  $\Lambda_0$ 为发射药初始体积, $\text{cm}^3$ ;  $de/dt$ 为发射药线性燃烧速率, $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。所以通常获得渐增性燃烧的方法是燃速调节、燃面调节及其组合<sup>[15]</sup>。由燃烧渐增性的定义及其推论可知,在几何燃烧定律<sup>[3]</sup>下,面积增加燃烧时能量释放一定为渐增的<sup>[2]</sup>。对预制刻槽发射药的燃烧过程建立物理模型及数学模型,在理论上证明其燃烧渐增性。

### 2.1 燃烧过程物理模型

以中心开孔式预制12个刻槽的发射药为例,建立如图3所示的燃烧过程物理模型。在起始状态,如图3a所示,预制刻槽闭合,发射药外观近似管状药。燃烧开始后,进入图3b所示开槽阶段,刻槽由闭合到打开并逐渐扩展,持续带来燃面的增加,是第一阶段。刻槽扩展到内侧相接时分离出中心管状药,此为如图3c所示的分界点I。此后主体部分如图3d所示继续扩槽燃烧,管状药近似恒面燃烧是第二阶段。刻槽与外侧相接时,如图3e所示,火药分裂,为分界点II,分离出的中心管状药燃完为分界点III。当刻槽到内外边界弧厚相等时,分界点II、III重合,即扩槽燃烧与管状药燃烧同时结束,图3所示即为此种情形;当刻槽位置向外侧移动,先到达分界点II,即在扩槽燃烧结束后,分离出的管状药会继续燃烧一段时间;向内侧移动

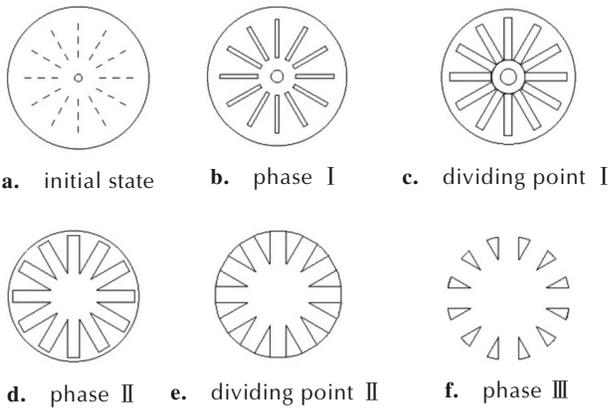


图3 预制刻槽发射药燃烧过程示意图  
Fig. 3 Schematic diagram of the combustion process for the pre-grooved gun propellant

则先到达分界点 III,即管状药先燃尽,随后扩槽结束,后两种情形会多一个燃烧阶段。如图 3f 所示的剩余扇形部分燃烧至结束,是第 3 阶段。

## 2.2 燃烧过程数学模型

### 2.2.1 基本假设

1)假设发射药内外直径分别为  $D_0$  和  $d_0$ ,  $D$  及  $d$  表示某一时刻的内外径;刻槽个数为  $n$ ,刻槽沿周向均匀分布;刻槽长度为  $a=\beta(D_0-d_0)/2$ , mm,其中  $\beta$  表示刻槽长度占整体弧厚的比例;刻槽位置量化为刻槽中点位置到圆心的距离,用  $b=\alpha(D_0-d_0)/4+d_0/2$  表示,单位为 mm,当位置控制系数  $\alpha=1$ ,表示刻槽中心到内外边界距离相等,当  $\alpha>1$ ,  $\alpha<1$  分别表明刻槽向外侧、内侧偏移;设已燃厚度  $x=D_0-D=d-d_0$ , 单位为 mm;

2)该发射药燃烧过程符合平行层燃烧假定<sup>[3]</sup>,即满足几何燃烧定律;

3)不计端面燃烧;

4)对开槽过程作简化处理,采用平行打开,逐步扩展的方式计算;

5)燃速与燃烧压力成正比,即满足  $u=\mu \cdot p$ ,其中  $u$  为火药线性燃速,  $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $\mu$  为燃速系数,  $p$  为实时燃烧压力, MPa。

### 2.2.2 已燃质量分数 $\Psi$ 理论计算

依据已燃质量分数  $\Psi$  的定义  $\Psi=m_{\text{已燃}}/m_{\text{全部}}=V_{\text{已燃}}/V_{\text{全部}}$  对其进行推导,其中,  $m_{\text{已燃}}$  为发射药已燃质量, g;  $m_{\text{全部}}$  为发射药初始质量, g;  $V_{\text{已燃}}$  为发射药已燃体积,  $\text{cm}^3$ ;  $V_{\text{全部}}$  为发射药初始体积,  $\text{cm}^3$ 。

为简化行文,仅列出关键结果。取  $\alpha>1$  即刻槽位置向外侧移动的情况,有 3 个分界点和结束点 4 个特殊值。

分界点 I :  $x=e_1=(2b-a) \tan \theta / (1+\tan \theta)$ ; 分界点

II :  $x=e_2=(D_0-2b-a)/2$ ; 分界点 III :  $x=e_3=(2b-a-d_0)/2$ ; 燃烧结束点 :  $x=e_4=e_2+m/k$ ; 其中  $e_1, e_2, e_3, e_4$  为已燃厚度  $x$  的 4 个特殊取值,  $x$  的取值范围为  $0 \leq x \leq e_4$ ;  $\theta=\pi/n, \text{rad}$ ;  $k=(\sin \theta+1)/(2 \sin \theta)$ , 无量纲参数;  $m=(D_0-e_2-e_2/\sin \theta)/2$ , 无量纲参数; 为方便表示而定义的参数,均不含  $x$ ,在对  $\Psi$  取导数时将其视为常数。式(2)~(8)列出各阶段及分界点处  $\Psi$  计算结果,其中  $\Psi_{\text{phase I}}$  表示第一阶段的  $\Psi$  计算结果,  $\Psi_{\text{dividing point I}}$  表示分界点 I 处的  $\Psi$  值,其他依此类推。

$$\psi_{\text{phase I}} = \psi(0 \leq x < e_1) = \frac{nx(x+a) + \frac{\pi}{4} [(d_0+x)^2 - d_0^2 + D_0^2 - (D_0-x)^2]}{\frac{\pi}{4} (D_0^2 - d_0^2)} \quad (2)$$

$$\psi_{\text{dividing point I}} = \psi(x = e_1) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \psi_{\text{phase II}} = \psi(e_1 < x < e_2) &= \psi_{\text{dividing point I}} + \frac{n(a+e_1 - \frac{x-e_1}{4 \tan \theta} + \frac{x}{2})(x-e_1)}{\frac{\pi}{4} (D_0^2 - d_0^2)} + \\ &\frac{(2b-a-e_1)^2 - (2b-a-x)^2 + (d_0+x)^2 - (d_0+e_1)^2}{(D_0^2 - d_0^2)} + \\ &\frac{(D_0-e_1)^2 - (D_0-x)^2}{(D_0^2 - d_0^2)} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\psi_{\text{dividing point II}} = \psi(x = e_2) \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \psi_{\text{phase III}} = \psi(e_2 < x < e_3) &= \psi_{\text{dividing point II}} + \frac{4\{m^2 - [m-k(x-e_2)]^2\}}{(D_0^2 - d_0^2)} + \\ &\frac{(2b-a-e_2)^2 - (2b-a-x)^2 + (d_0+x)^2 - (d_0+e_2)^2}{(D_0^2 - d_0^2)} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\psi_{\text{dividing point III}} = \psi(x = e_3) \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \psi_{\text{phase IV}} = \psi(e_3 < x \leq e_4) &= \psi_{\text{dividing point III}} + \frac{4\{[m-k(e_3-e_2)]^2 - [m-k(x-e_2)]^2\}}{(D_0^2 - d_0^2)} \end{aligned} \quad (8)$$

### 2.2.3 发射药气体生成猛度 $\Gamma$ 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  $\frac{d\psi}{dt} = \frac{d\psi}{dx} \cdot \frac{dx}{dt}$ ,  $\frac{dx}{dt} = 2u$ , 如前假设,火药燃速符合正比关系式  $u=\mu \cdot p$ , 则气体生成猛度  $\Gamma$  满足:

$$\Gamma = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\psi}{dt} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\psi}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{d\psi}{dx} \cdot 2\mu \cdot \rho = 2\mu \cdot \frac{d\psi}{dx} \quad (9)$$

对  $\Psi$  求导并带入(9)式可得式(10)~(13)所示  $\Gamma$  计算结果,其中  $\Gamma_{\text{phase I}}$  表示第一阶段  $\Gamma$  计算结果,其他依此类推。

$$\Gamma_{\text{phase I}} = \mu \cdot \frac{8n(2x + a) + 4\pi(D_0 + d_0)}{\pi(D_0^2 - d_0^2)} \quad (10)$$

$$\Gamma_{\text{phase II}} = \mu \cdot \frac{8n(a + e_1 - \frac{x - e_1}{2 \tan \theta}) + 4n(2x - e_1)}{\pi(D_0^2 - d_0^2)} + \mu \cdot \frac{4(2b - a + d_0 + D_0 - x)}{(D_0^2 - d_0^2)} \quad (11)$$

$$\Gamma_{\text{phase III}} = \mu \cdot \frac{16k[m - k(x - e_2)] + 8b - 4a + 4d_0}{(D_0^2 - d_0^2)} \quad (12)$$

$$\Gamma_{\text{phase IV}} = \mu \cdot \frac{16k[m - k(x - e_2)]}{(D_0^2 - d_0^2)} \quad (13)$$

根据上述  $\Gamma$ 、 $\Psi$  关系式,选定参数值  $D_0=7$  mm;  $d_0=0.4$  mm;  $n=8$ ;  $\beta=0.2$ ;  $\alpha=1$ ,得到如图4所示的  $\Gamma$ - $\Psi$  示意曲线<sup>[5]</sup>。结合式(2)~(13)及图4可知, $\Gamma$ - $\Psi$  曲线在刻槽逐渐打开及扩展阶段  $\Gamma$  随  $\Psi$  增加而增加,说明这种预制刻槽发射药在原理上具有一定的能量释放渐增性。同时可以从火药内径  $d_0$ 、外径  $D_0$ 、刻槽个数  $n$ 、刻槽长度  $a$ 、刻槽位置  $b$  等多个维度调节控制发射药燃气释放规律。

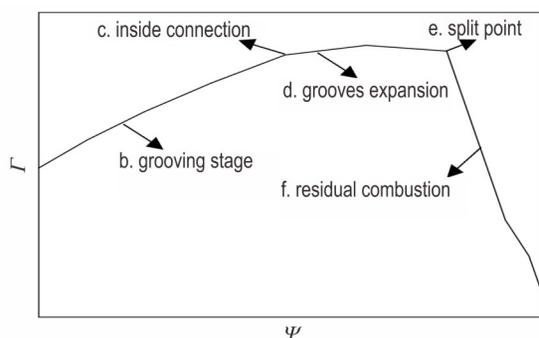


图4 理论计算  $\Gamma$ - $\Psi$  示意曲线

Fig.4 Calculated curve of the  $\Gamma$ - $\Psi$  relation

### 3 燃烧性能试验表征

#### 3.1 试验试样

采用1.2节所述方法制备了不同刻槽数目、不同长径比的3种预制刻槽发射药,分别命名为1#、2#、3#,结构、尺寸等参数如表1所示。参照样为10/7发射药及10/7包覆发射药,分别命名为4#、5#。参照样由泸州北方化学工业有限公司提供。

表1 预制刻槽发射药结构参数

Table 1 The structural parameters of pre-grooved gun propellants

samples	$n$ / quantity	$\beta$ / %	$\alpha$ / %	$D_0$ / mm	$d_0$ / mm	$r$
1#	6	0.5	1	7	0.4	1:1.6
2#	12	0.5	1	7	0.4	1:1.6
3#	12	0.5	1	7	0.4	1:1.4

Note:  $n$  is the number of grooves.  $\beta$  represents the ratio of the groove length to the overall thickness.  $a$  is the length of the groove.  $D_0$  is the outer diameter of the propellant.  $d_0$  is the inner diameter of the propellant.  $r$  is the ratio of the overall length of the propellant to outside diameter.

#### 3.2 密闭爆发器试验

按照 GJB770B-2005 火药试验方法 703.1<sup>[16]</sup>,采用 100 mL 密闭爆发器测定发射药的静态燃烧性能。装填密度为  $0.2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,点火药为 C 级硝化棉药粉,点火压力为 10 MPa。将实验采集的压力-时间 ( $p$ - $t$ ) 曲线依照式(14)、式(15)进行处理后可得到动态活度-相对压力 ( $L$ - $B$ ) 曲线:

$$L = \frac{dp(t)/dt}{\rho(t) \cdot p_m} \quad (14)$$

$$B = \frac{\rho(t)}{\rho_m} \quad (15)$$

式中, $L$  为动态活度,  $\text{MPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ;  $p_m$  为实验最大压力, MPa;  $B$  为相对压力, %。

#### 3.3 燃烧渐增性评价方法

采用燃烧特征参数  $\Delta L$  ( $\text{MPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ )、 $L_m/L_0$  (%)、 $B_m$  (%) 综合评价发射药燃烧渐增性<sup>[17]</sup>。其中,  $L_0$  为起始动态活度,一般取点火阶段过后稳定燃烧的初始  $L$  值,此时对应的  $B$  值为  $B_0$ ;  $L_m$  为动态活度的最大值,此时对应的  $B$  值为  $B_m$ ;  $\Delta L = L_m - L_0$  即动态活度增量;  $\Delta L$  和  $L_m/L_0$  值越大,说明渐增幅度越大<sup>[8]</sup>;  $B_m$  值越大,说明渐增燃烧区间越广,实际燃烧分裂点越延后。

## 4 结果与讨论

#### 4.1 燃烧渐增性验证

为验证预制刻槽发射药的燃烧渐增性,以表1中3种试样为研究对象进行密爆试验,得到如图5所示的  $p$ - $t$ 、 $L$ - $B$  曲线。表2中列出3种试样的燃烧渐增性特征参数。密爆试验表明,3种试样  $L_m/L_0$  值均在1.3以上,  $L$ - $B$  曲线都有明显的渐增燃烧趋势,此结果表明预制刻槽方法具有理论希望的燃烧渐增性。随着刻槽数量由6个增加到12个,  $L_m$  对应的  $B_m$  值由0.44提高到0.57,  $\Delta L$  提高了46.67%。原因在于刻槽数增多,刻槽

开启与扩展带来的燃面增加更为显著,因此提高了 $\Delta L$ 值;同时剩余扇形部分由6个变为12个,更易燃尽,分裂点后移,因此 $B_m$ 值也有明显提升。说明随刻槽数目增多,发射药渐增性变好,且能有效调节燃气释放规律,符合设计预期。从图5还可看出,相同刻槽数目下,低长径比的试样燃尽时间更短,动态活度 $L$ 值增大大约10%,这是由于切长缩短后,相同质量的发射药起始表面积增大所致<sup>[18]</sup>。说明长径比减小会缩短发射药燃尽时间,提高渐增性特征量 $L$ 的数值,对燃气释放渐增性具有一定调节作用。

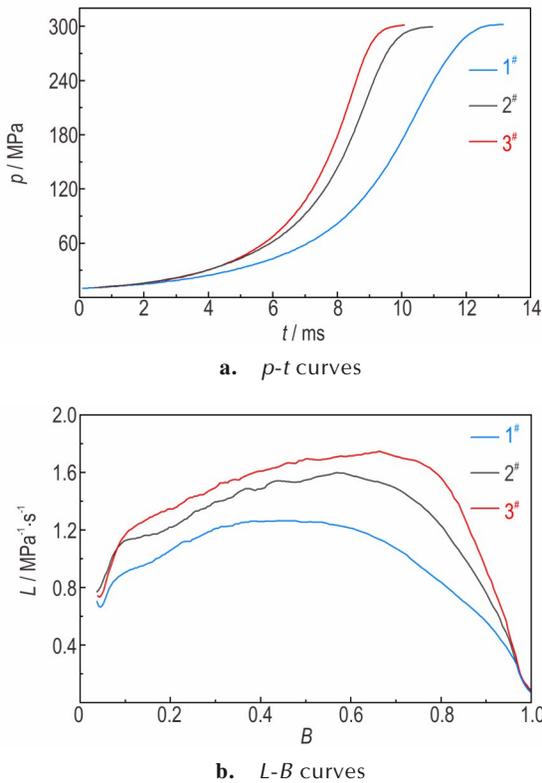


图5 3种预制刻槽发射药样品的 $p-t$ 及 $L-B$ 曲线  
 Fig.5 The  $p-t$  and  $L-B$  curves of three pre-grooved gun propellant samples

表2 3种预制刻槽发射药样品的燃烧渐增性特征参数  
 Table 2 Progressive combustion characteristic parameters of three kinds of pre-grooved gun propellant samples

samples	$B_0$ /%	$L_0$ /MPa <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup>	$B_m$ /%	$L_m$ /MPa <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup>	$(L_m/L_0)$ /%	$\Delta L$ /MPa <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup>
1 <sup>#</sup>	0.1500	0.9674	0.4400	1.2667	1.3095	0.2994
2 <sup>#</sup>	0.1500	1.1614	0.5681	1.6002	1.3778	0.4388
3 <sup>#</sup>	0.1500	1.3087	0.6057	1.7478	1.3355	0.4391

Note: 1)  $B$  is the relative pressure. 2)  $L_0$  is the initial dynamic activity. 3)  $B_m$  is the relative pressure at split point. 4)  $L_m$  is maximum activity. 5)  $L_m/L_0$  is progressive combustion characteristic. 6)  $\Delta L$  is the combustion enhancement value.

## 4.2 燃烧性能对照

将4<sup>#</sup>七孔发射药及5<sup>#</sup>七孔包覆药作为3<sup>#</sup>样的参比样,得到如图6所示的 $p-t$ 、 $L-B$ 曲线,表3中列出此3种试样的燃烧渐增性特征参数。由图6b可知,七孔发射药在起始阶段 $L$ 值快速上升,在 $B$ 值为0.2~0.4的范围内, $L$ 值仅有微小增加,燃烧过程近似恒面燃烧。七孔包覆药有效降低了起始动态活度,在 $B$ 值为0.1~0.4的范围内, $L$ 值增加,达到渐增燃烧效果。预制刻槽发射药试样在 $B$ 值为0.1~0.6的范围内, $L$ 值持续均匀增

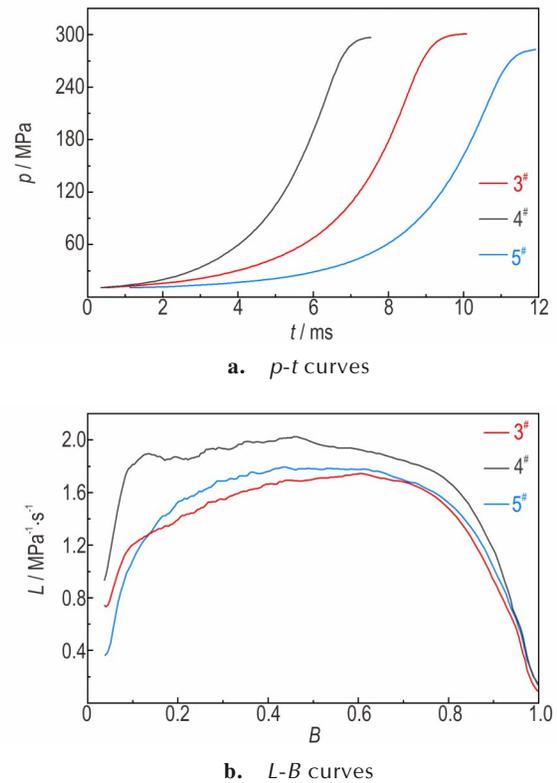


图6 3<sup>#</sup>预制刻槽发射药与4<sup>#</sup>七孔发射药、5<sup>#</sup>七孔包覆药 $p-t$ 及 $L-B$ 对照曲线

Fig.6 The  $p-t$  and  $L-B$  curves of pre-grooved gun propellant comparing with that of seven-hole propellant and coated seven-hole propellant

表3 预制刻槽发射药与七孔发射药、七孔包覆药样品的燃烧渐增性特征参数

Table 3 Progressive combustion characteristic parameters obtained for the pre-grooved gun propellant, seven-hole propellant and coated seven-hole propellant samples

samples	$B_0$ /%	$L_0$ /MPa <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup>	$B_m$ /%	$L_m$ /MPa <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup>	$(L_m/L_0)$ /%	$\Delta L$ /MPa <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup>
4 <sup>#</sup>	0.1500	1.8878	0.4575	2.0268	1.0736	0.1390
5 <sup>#</sup>	0.1500	1.3547	0.4399	1.7938	1.3241	0.4391
3 <sup>#</sup>	0.1500	1.3087	0.6057	1.7478	1.3355	0.4391

加,曲线上升趋势显著,有良好的燃烧渐增性。由表3数据定量分析可知,相比七孔发射药,预制刻槽发射药 $\Delta L$ 值由 $0.14 \text{ MPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 增加到 $0.44 \text{ MPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ,提高了2倍, $L_m/L_0$ 值由1.0736提高到1.3355,提高了24.4%,增面效果更为显著; $B_m$ 值由0.46延后到0.61,增加了32.4%,说明预制刻槽方法比七孔发射药具有更显著的燃烧渐增性。与七孔包覆药相比, $\Delta L$ 值及 $L_m/L_0$ 值相同, $B_m$ 值有所延后,说明预制刻槽方法能够达到七孔包覆药的渐增效果。

综上,试验结果表明,预制刻槽发射药具有理论设计的燃烧渐增性,其渐增性优于七孔发射药,可以达到七孔包覆药的渐增效果。

## 5 结论

本工作基于枪炮内弹道学原理提出了预制刻槽增面燃烧发射药的概念,设计了一种中心开孔式预制刻槽发射药结构,采用理论推导和试验验证的方法分析了其能量释放渐增性,得到如下结论:

(1)建立了预制刻槽发射药燃烧过程的物理、数学模型,推导出 $T-\Psi$ 关系式,理论证明了其燃烧渐增性及能量释放规律多维度调节与控制方法。

(2)设计了专用模具,提出了预制刻槽增面燃烧结构的工艺实现方法。制备了不同刻槽数、不同长径比的预制刻槽发射药。预制刻槽发射药制备过程工艺简洁,具有实践上的可行性。

(3)采用密闭爆发器试验表征其燃烧性能,结果表明,制备的3种预制刻槽发射药(1#、2#、3#) $L_m/L_0$ 值均在1.3以上, $L-B$ 曲线均有渐增阶段,试验验证了其燃烧渐增性;与七孔发射药相比, $L-B$ 曲线渐增燃烧趋势明显, $\Delta L$ 值提高了2倍, $L_m/L_0$ 值提高了24.4%, $B_m$ 值增加了32.4%,说明其燃烧渐增性优于七孔发射药,可以达到七孔包覆药的渐增效果。预制刻槽发射药具有原理上的先进性和实践上的可行性,是一种新型的燃面渐增性发射药。

### 参考文献:

- [1] 王泽山,何卫东,徐复铭.火药装药设计原理与技术[M].北京:北京理工大学出版社,2006.  
WANG Ze-shan, HE Wei-dong, XU Fu-ming. The principle and technique for propellant charging design[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2006.
- [2] 肖忠良.火炸药导论[M].北京:国防工业出版社,2019.  
XIAO Zhong-liang. The introduction of propellants and explosives[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2019.
- [3] 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 ballistics of guns[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2004.
- [4] 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.
- [5] 刘平,马忠亮,王率宇,等.七孔变燃速发射药燃烧性能数值计算[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.
- [6] 李时 Ying, 陶 中安, 丁 亚 军, 等. 梯度 脱 硝 化 策略 消除 邻 苯 二甲 酸 酯 类 潜在 危害 的 研 究 [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2020, 45: 1156-1163.
- [7] ZHOU Meng-lei, ZHANG Li-na, LIU Yang, et al. Optimization of the coating technology for super-porous[J]. *Propellant Materials Science Forum*, 984: 177-182.
- [8] 张丽娜,王英博,南风强,等.双层包覆对超多孔发射药燃烧性能的影响[J].含能材料,2019-12-17.  
ZHANG Li-na, WANG Ying-bo, NAN Feng-qiang, et al. Effect of double-layer coating on combustion performance of super-porous propellant[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2019-12-17.
- [9] 蒋 帅, 刘 琼, 南 风 强, 等. 37 孔 硝 基 胍 发 射 药 单 一 装 药 和 混 合 装 药的 燃 烧 性 能 [J]. 含 能 材 料, 2021, 29(3): 228-233.  
JIANG Shuai, LIU Qiong, NAN Feng-qiang, et al. Combustion performance of single charge and mixed charge of 37-hole nitroguanidine propellant[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2021, 29(3): 228-233.
- [10] 唐小军,冯昌林,赵煜华,等.七孔药内外弧厚差异对其燃烧性能的影响[J].火炸药学报,2016,39(4):97-101.  
TNAG Xiao-jun, FENG Chang-lin, ZHAO Yu-hua, et al. Effect of inside and outside web thickness difference on the combustion performance of 7-perf granular gun propellant[J]. *Chinese Journal of Explosives and Propellants*, 2016, 39(4): 97-101.
- [11] 梁昊,丁亚军,李世影,等.钝感双基发射药老化迁移机理及动力学过程[J].含能材料,2021,29(11):1080-1088.  
LIANG Hao, DING Ya-jun, LI Shi-ying, et al. Aging migration mechanism and kinetic process of deterred DB propellants[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2021, 29(11): 1080-1088.
- [12] VOGELSANGER B, OSSOLA B, BRÖNNIMANN E. The diffusion of deterrents into propellants observed by FTIR microspectroscopy quantification of the diffusion process [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 1996, 21: 330-336.
- [13] 黄振亚,范建芳,陈余谦.叠氮硝胺发射药表面钝感新技术[J].兵工学报,2014,35(2):182-187.  
HUANG Zhen-ya, FAN Jian-fang, CHEN Yu-qian. A new deterring technique of azidonitramine propellant[J]. *Acta Armamentarii*, 2014, 35(2): 182-187.
- [14] 郑文芳,潘仁明,蔺向阳,等.邻苯二甲酸二丁酯含量与发射药燃烧游离碳生成量的关系[J].含能材料,2011,19(3):330-334.  
ZHENG Wen-fang, PAN Ren-ming, LIN Xiang-yang, et al. Effect of dibutyl phthalate on combustion carbon residue of

- double-based propellant[J]. *Chinese Journal of Energetic Material*(*Hanneng Cailiao*), 2011, 19(3): 330-334.
- [15] 李世影, 丁亚军, 梁昊, 等. 梯度硝基发射药的设计原理与实现方法[J]. *兵工学报*, 2020, 41(11): 2198-2205.  
LI Shi-ying, DING Ya-jun, LIANG Hao, et al. Design principle and realizable approach of nitro gradiently distributed propellant[J]. *Acta Armamentarii*, 2020, 41(11): 2198-2205.
- [16] 国防科学技术工业委员会. GJB 770B-2005 火药试验方法[S]. 北京: 国防科工委军标出版发行部, 2005.  
COSTIND. GJB 770B-2005 Test method of propellant[S]. Beijing: Publication Department of COSTIND, 2005.
- [17] 黄振亚, 贾永杰, 崔鹏腾, 等. 叠氮硝胺发射药的燃烧性能调控技术[J]. *含能材料*, 2013(6): 795-799.  
HUANG Zhen-ya, JIA Yong-jie, CUI Peng-teng, et al. Modulating technology for combustion performance of azidonitramine gun propellant[J]. *Chinese Journal of Energetic Material* (*Hanneng Cailiao*), 2013(6): 795-799.
- [18] XIAO Zheng-gang, XU Fu-ming. Relationship between slivering point and gas generation rules of 19-perforation TEGDN propellants with different length/outside diameter ratios and perforation diameters [J]. *Journal of Energetic Materials*, 36(2): 141-151.

## Principle and Control Method of Pre-grooved Gun Propellant with Progressive Combustion Feature

ZHANG Yan-kang<sup>1</sup>, XIAO Zhong-liang<sup>1,2</sup>, LIU Xiang<sup>3</sup>, ZHANG Hua-jun<sup>3</sup>, LI Shi-ying<sup>2</sup>, LIN Zhao-qiang<sup>3</sup>

(1. School of Environment and Safety Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China; 2. School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 3. Luzhou North Chemical Industries Co. Ltd, Luzhou 646003, China)

**Abstract:** In order to obtain the gun propellant with progressive combustion characteristics and corresponding control methods at multi-dimensions, according to the principle of internal ballistics, the concept of the pre-grooved gun propellant was proposed. The physical and mathematical models of the combustion process were established, and the  $T-\Psi$  relationship was deduced. The principle of progressive combustion and multi-dimensional control methods were demonstrated. The method used for the preparation of the pre-grooved gun propellant was described. The pre-grooved gun propellant structured with a center opening was designed, and propellants having different groove numbers and various length/outside diameter ratios were prepared. In order to compare with the seven-hole propellants with and without coating, the combustion performance of the pre-grooved gun propellant was characterized by the closed bomb test. The experimental results show that the pre-grooved gun propellant has the progressive combustion behavior as theoretically designed. Compared with the seven-hole propellant, the combustion enhancement value ( $\Delta L$ ) value obtained by using this method is increased by 2 folds, the progressive combustion characteristic ( $L_m/L_0$ ) value is increased by 24.4%, and the relative pressure at the split point ( $B_m$ ) value is increased by 32.4%. The progressive combustion feature exhibited by pre-grooved gun propellants outperforms that of the seven-hole propellant, and was comparable to that of the coated seven-hole propellant.

**Key words:** solid gun propellant; pre-grooved; structural design of propellant; combustion performance; surface progressivity

**CLC number:** TJ55; TQ 562

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2022128

(责编: 姜梅)