

文章编号: 1006-9941(2016)05-0491-06

# 基于3D打印技术的发射药燃烧增面设计

张洪林, 刘宝民, 马新安, 邓在银, 张 宸

(辽宁庆阳特种化工有限公司, 辽宁 辽阳 111002)

**摘要:** 为了研究提高发射药燃烧增面技术,根据3D打印技术可制造特殊形状物体的原理和发射药平行层燃烧定律,设计了具有多列环形空槽管形结构的高燃烧增面的整体发射药。分析了整体发射药燃面和燃气生成量及燃气生成速率随燃烧进行的变化规律。建立了整体发射药相对燃面和相对燃气生成量随燃烧进行的变化规律计算方法。对比分析了整体发射药与19孔粒状发射药的相对燃面和相对燃气生成量随相对燃烧层厚度变化的规律。结果表明,设计的整体发射药具有较高的燃烧增面,可用于155 mm火炮的整体发射药,燃烧结束时相对燃面比19孔粒状发射药的相对燃面大3.1倍。整体发射药在燃烧过程中,燃气生成速率呈现前低后高的状态,75.612%的燃气生成量在整体发射药燃烧的后半程产生,比19孔粒状发射药高27.575%。

**关键词:** 3D打印技术; 整体发射药; 燃烧增面性**中图分类号:** TJ55; O69**文献标志码:** A**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.05.011

## 1 引言

发射药燃烧是身管武器发射弹丸获取能量的基础,由内弹道理论和火炮发射技术的实践可知,采用燃烧渐增性发射药是提高火炮发射威力和弹道效率的有效方法之一<sup>[1]</sup>。实现发射药燃烧渐增性有两种途径,一种是以化学组分变化来改变发射药药体的燃速,达到燃速渐增性燃烧;另一种是使发射药燃烧面逐渐增加,从而达到燃面渐增性燃烧<sup>[2-3]</sup>。传统的制式发射药受制造工艺技术限制,因而实现渐增性燃烧的几何形状和化学组分是有限的。从控制燃速技术的研究看,采用改变化学组分来实现发射药渐增性燃烧存在化学稳定性问题,而燃面控制技术则是一种更为实用的技术。因此,研究通过改变发射药的几何形状来实现燃烧渐增性对提高发射药性能具有重要意义。目前,实现发射药渐增性燃烧技术的主要研究集中在改变发射药的燃速和多孔粒状药,而从根本上改变现有发射药的药型设计研究则较少。肖忠良等研究了通过改变发射药粒内外层的燃速达到能量释放渐增性的变燃速发射药技术<sup>[4-6]</sup>;徐汉涛<sup>[7]</sup>、王锋<sup>[8]</sup>等研究了既具有多孔粒状发射药良好的燃烧渐增性又能有效提高

发射药装填密度的部分切口多孔杆状发射药技术;王琼林<sup>[9]</sup>等研究了发射药表层结构的特殊设计,使其由外及里燃速不断增加的程序控制燃烧发射药技术;魏伦<sup>[10]</sup>等研究了采用内部为速燃层,外部为缓燃层来提高燃烧渐增性的多层发射药技术。

3D打印技术的发展,为设计燃烧增面性较高的发射药提供了可行的技术途径。3D打印技术是指采用分层加工、迭加成形的方式逐层增加材料来生成实体的制造技术<sup>[11-14]</sup>,其最突出的优点是无需机械加工或模具,就能直接从计算机图形数据中生成特种形状的物体,从而克服了模具限制,可制造出复杂形状的物体。因此,应用3D打印技术,可突破传统发射药药型设计限制,充分利用发射药燃烧过程中燃面变化来实现发射药的高增面性燃烧。本研究提出了基于3D打印技术完成制造的具有多列环形空槽管形结构的高燃烧增面性整体发射药设计技术,从理论上计算了整体发射药的相对燃面和燃气生成量的变化规律,为新型发射药的药型设计奠定了基础。

## 2 整体发射药药型设计

发射药燃烧过程中燃气生成量是随火药厚度和沿火药厚度燃烧快慢的变化规律而变化的。对于性质相同的发射药,其燃烧过程由几何燃烧定律可知,是按发射药表面平行层逐层燃烧的<sup>[15]</sup>。

根据3D打印技术的特点和发射药增面燃烧需

收稿日期: 2015-05-19; 修回日期: 2015-09-09

基金项目: 装备与技术创新项目(BQG375201503)

作者简介: 张洪林(1960-),男,研究员,主要从事发射药研究。

e-mail: CNGCZHL@163.com

求,将发射药设计成整体式结构,通过逐层增材的方式按所设计药型完成制造。整体发射药是具有内部环形空槽,径向脉冲式增面燃烧特点,且可直接用于发射装药的发射药柱,整体发射药局部结构示意图见图1。整体发射药外形是厚壁管形结构,在管壁中的轴向方向制成多列具有相同宽度,不同高度的环形空槽。为了保证整体发射药的燃烧完全性和燃烧增面性,第二列环形空槽的数量和除环形空槽宽度以外的其它尺寸均按几何级数在第一列环形空槽的基础上增加,并依此类推到其它列环形空槽。各列环形空槽的高度等于同列轴向火药燃烧层厚度的1/2,两列环形空槽之间的距离与靠近轴线方向的环形空槽火药燃烧层厚度相同。整体发射药的外表面进行阻燃涂覆,外表面不燃烧,当燃烧从内孔开始时,燃烧到每列环形空槽时,前列环形空槽没有任何剩余残药,使发射药的燃烧始终处于增面燃烧状态。

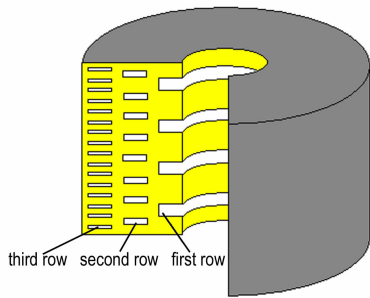


图1 整体发射药局部结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the part structure of integral propellant

设管形结构的整体发射药内孔半径为  $r$ ,药柱半径为  $R$ ,靠近内孔的第一列环形空槽的数量为  $N_1$ ,火药燃烧层厚度为  $a$ ,环形空槽的宽度为  $b$ ,环形空槽的高度为  $c$ ;第一列与第二列环形空槽的距离为  $a$ , $n$ 为整体发射药环形空槽列的序号。整体发射药的单位体积结构见图2。

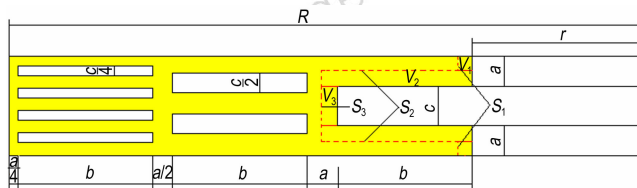


图2 整体发射药的单位体积结构

Fig.2 The structure of unit volume for the integral propellant

因此,整体发射药的环形空槽具有如下特点:

- (1)第  $n$  列环形空槽的数量为:  $N_n = 2^{n-1} N_1$
- (2)第  $n$  列环形空槽火药燃烧层厚度为:  $a_n = \frac{a}{2^{n-1}}$
- (3)第  $n$  列环形空槽的高度为:  $c_n = \frac{c}{2^{n-1}}$
- (4)第  $n$  列环形空槽的内孔半径为:  
$$r_n = r + (2 - \frac{1}{2^{n-2}}) a + (n-1) b$$
- (5)各列环形空槽的宽度均相等。

### 3 整体发射药的燃烧规律

#### 3.1 整体发射药相对燃面随燃烧进行的变化规律

假设整体发射药起始燃烧是采用中心点火方式<sup>[16]</sup>,由管形结构的中心孔道将其内表面点燃,整体发射药的外表面有阻燃涂层而不燃烧,则以具有三列环形空槽的整体药为例,建立整体发射药相对燃面随燃烧进行的变化规律。

发射药燃烧遵循几何燃烧定律, $u$ 为发射药燃速, $t$ 为燃烧时间,则:

整体发射药单位体积起始燃烧面积为  $S_0$ :

$$S_0 = 2[2\pi ar + \pi[(r+b)^2 - r^2]] + 2\pi c(r+b) \quad (1)$$

燃烧到  $t$  时刻时,整体发射药正在燃烧的面积  $S$ :

$$S = 2^{n-1} [2(S_1 + S_2) + S_3] \quad (2)$$

式中, $S_1$ 是环形空槽外端正正在燃烧的面积

$$S_1 = 2\pi(r_n + ut)(a_n - ut)$$

$S_2$ 是环形空槽上下两面正在燃烧的面积

$$S_2 = \pi((r_n + b + ut)^2 - (r_n + ut)^2)$$

$S_3$ 是环形空槽内端面正在燃烧的面积

$$S_3 = 2\pi(r_n + b + ut)(c_n + 2ut)$$

当  $ut < a$  时,第一列环形空槽在燃烧,  $n=1$ ,

当  $(a+a/2) > ut > a$  时,第二列环形空槽在燃烧,  $n=2$

当  $ut > (a+a/2)$  时,第三列环形空槽在燃烧,  $n=3$

所以,由单位体积整体发射药正在燃烧的面积  $S$  与单位体积整体发射药的起始面积  $S_0$ ,可计算出单位体积整体发射药的相对燃烧面积  $\sigma$  变化规律。

$$\sigma = \frac{S}{S_0} \quad (3)$$

#### 3.2 整体发射药燃气生成量随燃烧进行的变化规律

与3.1假设条件相同,建立整体发射药燃气生成量随燃烧进行的变化规律。

整体发射药单位体积起始燃烧体积  $V_0$ :

$$V_0 = V_{00} - (V_{01} + 2V_{02} + 4V_{03}) \quad (4)$$

式中,  $V_{00} = \pi((r+7a/4+3b)^2 - r^2)(2a+c)$

$V_{01}$ 是第一列单个环形空槽的体积

$$V_{01} = \pi((r+b)^2 - r^2)c$$

$V_{02}$ 是第二列单个环形空槽的体积

$$V_{02} = \pi((r+a+2b)^2 - (r+a+b)^2)c/2$$

$V_{03}$ 是第三列单个环形空槽的体积

$$V_{03} = \pi((r+3a/2+3b)^2 - (r+3a/2+2b)^2)c/4$$

燃烧到  $t$  时刻时,整体发射药已经燃烧掉的体积

$V_{YRn}$ :

令:  $V_{YR0} = 0$ , 则:

$$V_{YRn} = 2^{n-1} [2(V_1 + V_2) + V_3] + V_{YR(n-1)} \quad (5)$$

式中,  $V_1$  是环形空槽外端燃烧掉的体积

$$V_1 = \pi[(r_n + ut)^2 - r_n^2](a_n - ut)$$

$V_2$  是环形空槽上下两面燃烧掉的体积

$$V_2 = \pi[(r_n + b + ut)^2 - r_n^2]ut$$

$V_3$  是环形空槽内端面燃烧掉的体积

$$V_3 = \pi[(r_n + b + ut)^2 - (r_n + b)^2]c_n$$

当  $ut < a$  时,第一列环形空槽在燃烧,  $n=1$ ,

当  $(a+a/2) > ut > a$  时,第二列环形空槽在燃烧,  $n=2$

当  $ut > (a+a/2)$  时,第三列环形空槽在燃烧,  $n=3$

所以,由单位体积整体发射药已经燃烧掉的体积

$V_{YRn}$ 与单位体积整体发射药的起始体积  $V_0$ ,可计算出单位体积整体发射药的相对燃气生成量  $\psi$  变化规律。

$$\psi = \frac{\omega_{YR}}{\omega} = \frac{V_{YRn}}{V_0} \quad (6)$$

### 3.3 整体发射药与 19 孔粒状药的相对燃面和相对燃气生成量变化规律对比

155 mm 火炮用 19 孔粒状药是目前燃烧增面性较高的粒状发射药<sup>[17]</sup>,它是含有 19 个均匀分布的贯通性圆形内孔的圆柱形粒状发射药,通过内孔燃烧来不断增大燃烧面积,19 孔粒状药结构见图 3。

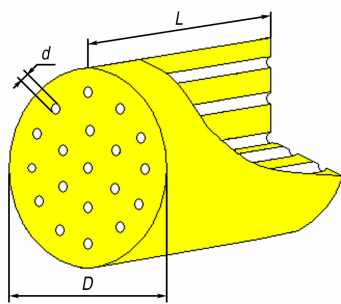


图 3 19 孔粒状发射药结构  
Fig.3 The structure of 19 holes granular propellant

以外径为  $\Phi 160$  mm,内径为  $\Phi 60$  mm,环形空槽尺寸为  $a=1$  mm,  $b=16$  mm,  $c=1$  mm 的整体发射药

与外径  $D=13.48$  mm,孔径  $d=0.38$  mm,长度  $L=13.48$  mm,燃厚  $2e_1=1.93$  mm 的 19 孔粒状发射药为例计算两种发射药的燃烧规律。

为了便于比较整体发射药与 19 孔粒状发射药的燃烧增面性,用变化参数的相对量来表征,以发射药相对燃烧层厚度( $Z$ )表征发射药的燃烧进行程度<sup>[18]</sup>,分别计算出整体发射药与 19 孔粒状发射药的相对燃面( $\sigma$ )和相对燃气生成量( $\psi$ )的变化规律。计算方法如下:

(1) 相对燃烧层厚度  $Z = \frac{e}{e_1}$ ,其中  $e$  为发射药燃烧到  $t$  时刻已燃烧掉的厚度,  $e_1$  为发射药起始燃烧层厚度。对于整体发射药,  $e=ut$ ,  $e_1 = (2 - \frac{1}{2^{n-1}})a$

(2) 相对燃面  $\sigma = \frac{S}{S_0}$ ,其中  $S$  为发射药燃烧到  $t$  时刻正在燃烧的面积,  $S_0$  为发射药起始燃烧面积,整体发射药  $S$  和  $S_0$  的计算公式见公式(1)和公式(2)。

(3) 相对燃气生成量  $\psi = \frac{V_{YRn}}{V_0}$ ,其中  $V_{YRn}$  为发射药燃烧到  $t$  时刻已燃烧掉的体积,  $V_0$  为发射药起始燃烧时的体积,整体发射药  $V_0$  和  $V_{YRn}$  的计算公式见公式(4)和公式(5)。

以相对燃烧层厚度( $Z$ )为自变量,按上述计算方法,用示例所给数据计算出两种发射药的相对燃面( $\sigma$ )和相对燃气生成量( $\psi$ )随相对燃烧层厚度( $Z$ )变化的趋势。计算所得到的  $\sigma-Z$  曲线和  $\psi-Z$  曲线如图 4、图 5 所示。

由图 4 可见,整体发射药相对燃面( $\sigma$ )在发射药燃烧过程中,随环形空槽列序的增加呈现出阶跃式增大;而 19 孔粒状发射药的相对燃面( $\sigma$ )在发射药燃烧过程中是逐渐增加的。在发射药燃烧的后半段,整体发射药的相对燃面( $\sigma$ )远大于 19 孔粒状发射药。这是由于整体发射药的结构中预制了不同尺寸的环形空槽,当燃烧每进行到下一列环形空槽时,整体发射药的环形空槽都会成倍增加所导致的;而 19 孔粒状发射药的燃烧面积增加只能依靠因燃烧产生的内孔径增大而增加内孔燃烧面积。因此,在发射药燃烧的后半段,整体发射药的相对燃面( $\sigma$ )高于 19 孔粒状发射药。

由图 5 可见,整体发射药的相对燃气生成量( $\psi$ )在发射药燃烧过程中呈现前低后高的状态,这种状态有利于降低火炮膛压,提高弹丸初速;而 19 孔粒状发射药的相对燃气生成量( $\psi$ )在发射药燃烧过程中近似于匀速增加。产生这种现象的原因是由于整体发射药

随燃烧进行环形空槽数量成倍增加,在发射药燃烧的后半段使相对燃气生成量( $\psi$ )快速增大。19孔粒状发射药在增大内孔燃烧面积的同时,外径减小导致外表面燃面减小,造成相对燃气生成量( $\psi$ )增加速率变

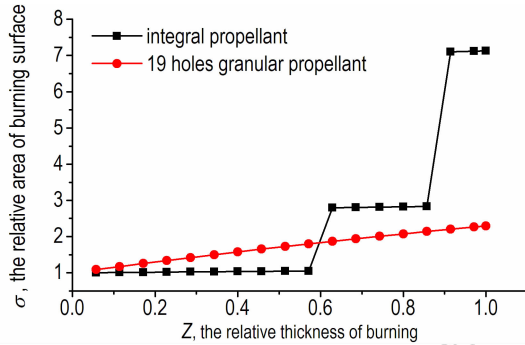


图4  $\sigma$ -Z 曲线

Fig. 4  $\sigma$ -Z curves

化较小。

根据上述计算方法,可计算出整体发射药与19孔粒状发射药不同燃烧阶段相对燃面的变化情况,结果见表1。

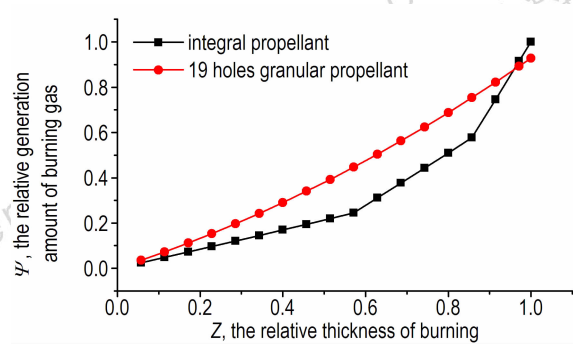


图5  $\psi$ -Z 曲线

Fig. 5  $\psi$ -Z curves

表1 整体发射药与19孔粒状发射药不同燃烧阶段相对燃面的变化情况

Table 1 Change situations of the relative area of burning surface of the integral propellant and 19 holes granular propellant in different burning stage

burning stage	Z	integral propellant		19 holes granular propellant	
		$\sigma$	$\Delta\sigma$	$\sigma$	$\Delta\sigma$
1 <sup>st</sup> row empty annular groove burning over	0.5714	1.05068		1.79869	
2 <sup>nd</sup> row empty annular groove burning over	0.8571	2.83094	1.78026	2.13920	0.34051
3 <sup>rd</sup> row empty annular groove burning over	1.0000	7.12803	4.29709	2.29480	0.15560

Note: Z is the relative thickness of burning,  $\sigma$  is the relative area of burning surface,  $\Delta\sigma$  is the change amount of the relative area.

由表1可见,以相对燃烧层厚度  $Z=0.5714$  为燃烧前后半程分界线,整体发射药在燃烧的后半程相对燃面( $\sigma$ )快速增加,最大相对燃面为7.1280。而19孔粒状发射药在燃烧的后半程相对燃面( $\sigma$ )增加程度减小,最大相对燃面仅为2.29480,燃烧结束时整体发射药相对燃面比19孔粒状发射药大  $\sigma_{\text{整体发射药}}/\sigma_{\text{19孔粒状药}}=3.1$  倍,表明整体发射药的燃烧增面性远大于19孔粒状发射药。这是由于整体发射药随燃烧的进行环形空槽数量不断增加而产生的。

根据上述计算方法,可计算出整体发射药与19孔粒状发射药不同燃烧阶段相对燃气生成量的变化情况,结果见表2。

由表2可见,整体发射药在第一列环形空槽燃烧阶段产生的相对燃气生成量为总相对燃气生成量的24.39%,在第二列环形空槽燃烧阶段产生的相对燃气生成量为总相对燃气生成量的57.76% - 24.388% = 33.372%,在第三列环形空槽燃烧阶段产生的相对燃气生成量为总相对燃气生成量的100% -

57.76% = 42.24%。以相对燃烧层厚度  $Z=0.5714$  为燃烧前后半程分界线,即第二、第三列环形空槽为整体发射药的后半程燃烧阶段,其相对燃气生成量合计为33.372% + 42.24% = 75.612%,表明整体发射药燃气生成主要是在燃烧的后半程产生,且相对燃气生成量随燃烧的进行不断增大。而与整体发射药相对燃烧层厚度相对应的19孔粒状发射药在燃烧的前半程相对燃气生成量为44.746%,在燃烧的后半程,相对燃气生成量合计为30.631% + 17.406% = 48.037%,表明19孔粒状发射药在燃烧的后半程相对燃气生成量增加程度较小。在燃烧的后半程,整体发射药相对燃气生成量比19孔粒状发射药高27.575% (75.612% - 48.037%),表明整体发射药具有较好的燃烧渐增性,符合发射药增面性燃烧需求,有利于提高初速,降低膛压。

## 4 结论

利用3D打印技术可突破传统发射药在药型设计上的限制,实现高燃烧增面性发射药的结构设计。

表2 整体发射药与19孔粒状发射药不同燃烧阶段相对燃气生成量的变化情况

Table 2 Change situations of the relative generation amount of burning gas of the integral propellant and 19 holes granular propellant in different burning stage

burning stage	Z	integral propellant		19 holes granular propellant	
		$\psi$	ratio of relative gas amount/%	$\psi$	ratio of relative gas amount/%
1 <sup>st</sup> row empty annular groove burning over	0.5714	0.24388	24.388	0.44746	44.746
2 <sup>nd</sup> row empty annular groove burning over	0.8571	0.57760	33.372	0.75377	30.631
3 <sup>rd</sup> row empty annular groove burning over	1.0000	1.00000	42.240	0.92783	17.406

Note:  $\psi$  is the relative generation amount of burning gas.

(1) 整体发射药采用内部预制环形空槽结构可有效提高发射药的燃烧增面性,燃烧结束时整体发射药相对燃面比19孔粒状发射药大3.1倍,具有较高的燃烧增面性。

(2) 整体发射药在燃烧过程中,燃气生成速率呈现前低后高的状态,75.612%的燃气生成量在燃烧的后半程产生,比19孔粒状发射药高约27.575%,具有有利于提高初速,降低膛压的燃气生成规律。

(3) 整体发射药改变了传统发射药设计与制造概念,使发射药与发射装药技术得到统一协调,整体发射药广泛应用于现有药筒装药、药包装药和模块装药中,将对发射药产生革命性进步。

3D打印技术为发射药的药型设计开辟了革命性的途径,应用3D打印技术可设计制造出符合高增面燃烧要求的整体发射药,并将改变药筒装药、药包装药及模块装药等现有的设计模式,满足提高火炮初速的需求。

#### 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: 19-46.  
JIN Zhi-ming. Interior ballistic of gun propellant[M]. Beijing: Beijing Institute of technology Press, 2004: 19-46.
- [2] 王泽山. 控制发射装药燃气生成规律的一种方法[J]. 中北大学学报, 2001, 22(4): 252-255  
WANG Ze-shan. A method of propellant charge technique to control the gas generate[J]. *Journal of North University of China*, 2001, 22(4): 252-255.
- [3] 王泽山. 发射药技术的展望[J]. 华北工学院学报, 2001(增刊): 36-40.  
WANG Ze-shan. Development and prospect of propellant techniques[J]. *Chinese Journal of North University of China (Suppl.)*, 2001: 36-40.
- [4] 肖忠良, 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.
- [5] 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 burning rate propellant[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2007, 15(2): 128-130.
- [6] 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 Explosives & Propellants*, 2011, 19(1): 69-73.
- [7] 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 multi-perforated stick propellant[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2014, 2(22): 251-255.
- [8] 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 Zi-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.
- [9] 王琼林, 刘少武, 张远波, 等. 程序控制燃烧发射药的概念和原理[J]. 火炸药学报, 2009, 32(5): 71-74.  
WANG Qiong-lin, LIU Shao-wu, ZHANG Yuan-bo, et al. Conception and principle of controlled burning gun propellant[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2009, 32(5): 71-74.
- [10] 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, 2009, 32(6): 75-78.  
WEI Lun, WANG Qiong-lin, LIU Shao-wu, et al. Combustion characteristics of multilayer gun propellant[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2009, 32(6): 75-78.
- [11] 卢秉恒, 李涤尘. 增材制造(3D打印)技术发展[J]. 机械制造与自动化, 2013, 42(4): 1-4.  
LU Bing-heng, LI Di-chen. Development of the additive manufacturing(3D printing) technology[J]. *Machine Building & Automation*, 2013, 42(4): 1-4.
- [12] 李涤尘, 贺健康, 田小永, 等. 增材制造: 实现宏微结构一体化制造[J]. 机械工程学报, 2013, 49(6): 129-135.  
LI Di-chen, HE Jian-kang, TIAN Xiao-yong, et al. Additive manufacturing: Integrated fabrication of macro/microstructures[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(6): 129-135.
- [13] Z. M. Bi, Lihui Wang. Advances in 3D data acquisition and processing for industrial applications[J]. *Robotics and Computer In-*



- egrated Manufacturing*, 2010, 26 (5): 403-413.
- [14] Henry Segerman. 3D Printing for Mathematical Visualisation[J]. *The Mathematical Intelligencer*, 2012, 34(4): 56-62.
- [15] 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. Theory and technology of propellant charge design [M]. Beijing: Beijing Institute of technology Press, 2006.
- [16] 任慧, 乔小晶, 焦清介, 等. 提高点火管点火性能的一种方法[J]. 含能材料, 2001, 9(2): 168-171.  
REN Hui, QIAO Xiao-jing, JIAO Qing-jie, et al. One way of improving ignition performance of ignition tub[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2001, 9(2): 168-171.
- [17] 赵毅, 邢浴仁. 关于刚性组合装药“全等式”结构与“不等式”结构的讨论[J]. 火炸药学报, 2001, 24(1): 27-29.  
ZHAO Yi, XING Yu-ren. Discussion on problems of unit-modular and bi-modular charges in the modular propelling charge system[J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2001, 24(1): 27-29.
- [18] 钟建华, 张丽华, 肖忠良, 等. 方片状变燃速发射药燃气生成规律理论分析[J]. 含能材料, 2010, 18(5): 579-582.  
ZHONG Jian-hua, ZHANG Li-hua, XIAO Zhong-liang, et al. Theoretical analysis of gas generation about variable burning rate gun propellant with square plate shape [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2010, 18(5): 579-582.

## Design of Increased Burning Area of Propellant Based on 3D Printing Technology

ZHANG Hong-lin, LIU Bao-min, MA Xin-an, DENG Zai-yin, ZHANG Chen

(Liaoning Qingyang Chemical Industry Corporation, Liaoyang 111002, China)

**Abstract:** To study the technology of improving the propellant increase burning area based on the principle of manufacturing the special shape objects by the 3D printing technology and the law of propellant burning parallel layers, the integral propellant with high increase burning area having multi empty annular groove tubular structure was designed. The changing rules of area of burning surface and the generation amount of burning gas and generation rate of burning gas for the integral propellant along with burning were analyzed. The calculation method of changing rule of the relative area of burning surface and the relative generation amount of burning gas along with burning were established. The changing rules of the relative area of burning surface and the relative generation amount of burning gas of the integral propellant and 19 holes granular propellant with the relative burning thickness were compared and analyzed. Results show that the designed integral propellant has higher burning area increase. The relative area of burning surface at the end of combustion for the integral propellant used for 155 mm howitzer is 3.1 times more than that of 19 holes granular propellant. The burning gas generation rate of the integral propellant reveals the status of first low and than high in the combustion process. The generation amount of burning gas in the integral propellant combustion after the half is about more than 75.612% of total generation amount of burning gas, 27.575% more than 19 holes granular propellant.

**Key words:** 3D printing technology; integral propellant; increase burning area

**CLC number:** TJ55; O69

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2016.05.011