文章编号: 1006-9941(2017)09-0722-04

# 一种新型大弧厚六翼星孔棒状发射药的燃烧特性

贾永杰,杨建兴,石先锐,崔鹏腾 (西安近代化学研究所,陕西西安710065)

terials.org.ch terials.org.ch terials.org.ch 摘 要:设计并制备了一种新型大弧厚六翼星孔棒状发射药,利用密闭爆发器研究了不同长径比(L/D=1,2,6)、不同端面封堵层 厚度/发射药弧厚比(s/e,=0,0.05,0.1)的星孔棒状发射药燃烧特性,并结合某大口径火炮进行了试验验证。结果表明,星孔棒状 发射药燃烧稳定,呈平行层燃烧。长径比 L/D 由 1 增加至 6 时,燃烧新增性因子 P,由 0.285 增加至 0.447,增加了 56.8%,而且最 大压力点滞后。端面封堵发射药的 L-B 曲线显示了明显的降低起始燃烧活性和燃烧破孔特征。s/e, 由 0 增加至 0.05、0.1 时, 星 孔棒状发射药的起始气体生成量降低了约1/2,破孔时间介于燃烧10%~20%(已燃份数)发射药所需燃烧时间之间。选择合适 封堵层厚度,可实现发射药燃气生成规律的可控调节。 $s/e_1$ 由 0增加至 0.05、0.1时,最大膛压  $p_m$ 分别下降 1.3% 和 3.5%,而离 炮口 32.5 m 处的弹丸初速分别提高 0.28% 和 1.4%。

关键词:星孔棒状发射药;长径比;端面封堵;燃烧特性;内弹道性能

中图分类号: TJ55; O64

文献标志码: A

**DOI**: 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.09.004

## 1 引言

棒状发射药装填密度高,内弹道性能平稳,且 发射药轴向排列能产生点火所需要的良好气流通 道,减小了局部压力波,在中大口径火炮发射装药 领域有着良好的应用前景[1-3]。20世纪60年代, 美国 XM578152 mm 火炮以及 70 年代中期 XM208 远程 155 mm 火炮均采用了棒状发射药作为发射装 药[2,4]。在坦克炮穿甲弹方面,美国目前最先进的 120 mm口径 M829A3 贫铀弹采用了 8.1 kg RPD-380 长棒状发射药[4]。棒状发射药的研究涉及单孔棒状 药、单孔开槽棒状药、PSS棒状药以及分段部分切口多 孔棒状药,其燃烧渐增性和内弹道性能逐步提高,PSS 棒状药和环切棒状药药型复杂,目前该方面的研究报 道较多[4-10],但制备工艺较为复杂。单孔棒状发射药 药型简单,是目前国内唯一成功通过无溶剂工艺制备 的发射药药型,研究表明,非开槽单孔棒状药中可能存 在的侵蚀燃烧效应能严重影响其大口径火炮中的内弹 道性能[11-13]。

基于提高单孔棒状药装填密度、燃烧渐增性等方 面的考虑,本研究设计了一种新型大弧厚六翼星孔棒

收稿日期: 2017-01-16; 修回日期: 2017-03-07

作者简介: 贾永杰(1971-),男,研究员,主要从事发射药配方设计技术 研究。e-mail: 15353495260@163.com

状发射药,针对非开槽单孔棒状药中可能存在的侵蚀 燃烧效应,重点讨论了不同长径比星孔棒状发射药燃 烧特征,并通过改变发射药长径比以及对发射药端面 进行封堵处理,并对处理后的发射药结合高膛压大口 径火炮进行了装药验证,分析了其内弹道性能,以期为 星孔棒状发射药的应用提供参考。

### 2 实验部分

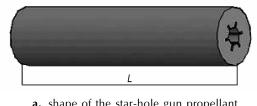
### 2.1 星孔棒状发射装药设计及制备

星孔棒状发射药外形结构如图 1a 所示, L 为发射 药长度。图 1b 为发射药端面结构,该结构的特性参 数为六翼,h为翼高,D为外径,d为孔径, $2e_1$ 为弧厚, 具体尺寸如图 1b 所示。

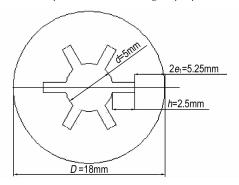
采用了一种高能三基发射药(配方代号 AH-1), 通过无溶剂压伸成型工艺以及专用切药机制备了长径 比 L/D=1、L/D=2、L/D=6 和 L/D=14 的星孔棒状 发射药样品。AH-1 的配方组成(质量分数)为: 硝化 棉(NC)42/硝化甘油(NG)28/黑索今(RDX)25/邻 苯二甲酸二丁酯(DOP)3.5/二号中定剂(C,)1.5。 以丙酮为溶剂,采用不同厚度的硝基软片对 L/D=6、 14 的发射药端面进行封堵处理,得到封堵片厚度与发 射药弧厚比  $s/e_1$ 分别为 0.05、0.1 的发射药样品。

### 2.2 静态燃烧性能测试及数据处理

利用100 mL常规密闭爆发器进行了L/D=1、



a. shape of the star-hole gun propellant



b. endstructure

图 1 星孔棒状发射药外形结构和端面结构示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of the shape and endstructure for the star-hole stick gun propellant

L/D=2的星孔棒状发射药及不同端面封堵的星孔棒状发 射药静态燃烧实验。由于长度较长,L/D=6 的发射药样 品采用 700 mL 密闭爆发器进行实验, L/D=14 的发射药 样品未进行密闭爆发器实验。实验条件均为:装填密度 0.2 g·cm<sup>-3</sup>、实验温度 20 ℃、点火压力 10 MPa。

通过对星孔棒状发射药进行密闭爆发器实验,得 到 p-t 曲线,对 p-t 曲线进行后处理得到 L-B 曲线。

### 2.3 内弹道性能测试

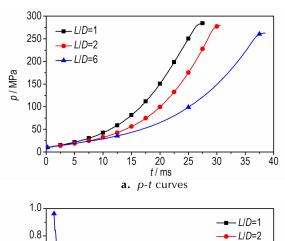
选用某大口径火炮对  $s/e_1$  分别为  $0 \ 0.05 \ 0.1$  的 端面封堵星孔棒状发射药进行内弹道性能实验,发射 药长径比为14。初速测试方法按GJB349.4-1987进 行; 膛压测试方法按 GJB349.5-1987 进行。

### 结果与讨论

#### 3.1 不同长径比星孔棒状发射药燃烧性能

通过长径比为L/D=1、L/D=2 和L/D=6 的星孔 棒状发射药的密闭爆发器实验,获得了发射药的燃烧 规律,结果如图 2 所示。由图 2a 可见,随着长径比增 大,发射药起始燃面降低,发射药燃烧时间明显延长; L/D=1、L/D=2 发射药最大压力基本相同,而 L/D=6发射药最大压力偏小,这可能是长径比增大后燃烧时 间延长使热损失增大。由图 2b 可见, 六翼星孔棒状 发射药呈平行层燃烧,燃烧稳定,没有出现侵蚀燃烧。

依据参考文献[10],计算发射药样品的燃烧渐增性因 子 P<sub>c</sub>,结果分别为 0.285、0.37 和 0.447。根据计算结 果可见,与 L/D=1 相比, L/D=6 时, P, 增加了 56.8%。 L/D=1 时,发射药燃烧活度缓慢下降; L/D=2 时,发射 药起始燃烧活度下降,随着 B 值增大,燃烧活度略微下 降; L/D=6 时,在燃烧过程中,发射药燃烧活度基本不 变,直至接近燃完时快速下降。长径比增大,初始燃面 和初始燃烧活度降低,端面对发射药燃烧减面性的影响 减小,发射药起始燃气生成猛度降低,最大压力点滞后。 ○ 另外,从图 2b 中可以看出,随着长径比增大,发射药燃 烧分裂点逐渐后移,分裂后未燃尽比例减小。



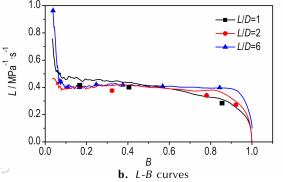


图 2 三种不同长径比发射药样品的 p-t 曲线及 L-B 曲线

Fig. 2 The p-t curves and L-B curves of three gun propellant samples with different L/D ratios

三种不同长径比发射药样品的 L-B 曲线特征点

**Table 1** Characteristic points of the *L-B* curves of three gun propellant samples with different L/D ratios

L/D	$B_s$	L <sub>s</sub>	L <sub>0.1</sub>	L <sub>0.3</sub>	$P_{\rm r}$
		/MPa <sup>-1</sup> • s <sup>-1</sup>	$/MPa^{-1} \cdot s^{-1}$	$/MPa^{-1} \cdot s^{-1}$	
1	0.886	0.295	0.465	0.453	0.285
2	0.89	0.333	0.383	0.418	0.37
6	0.923	0.383	0.407	0.421	0.447

Note: L/D is the ratio of length to diameter,  $B_s$  is the splitting point of combustion,  $L_s$  is the dynamic vivacity at  $B_s$ ,  $L_{0.1}$  is the dynamic vivacity when B is 0.1,  $L_{0.3}$  is the dynamic vivacity when B is 0.3,  $P_{\rm r}$  is the combustion progressing factor.

## 3.2 端面封堵星孔棒状发射药燃烧性能

图 3 是长径比 L/D=6,  $s/e_1$ 分别为 0、0.05、0.1 三种不同端面封堵厚度的星孔棒状发射药的定容燃烧压力-时间曲线。从图 3 可看出,封堵片厚度越厚,即  $s/e_1$ 越大,定容燃烧时间曲线上升越缓慢,燃烧的时间越长。表 2 是三种不同端面封堵厚度的星孔棒状发射药的燃烧特征点,其中  $t_{50}$ 为压力达到 50 MPa 时的燃烧时间,由表 3 看出,随着封堵片厚度的增加,最大压力基本维持不变,由 50 MPa 到最大压力的燃烧时间( $t_{\kappa}$ - $t_{50}$ )也变化不大,而达到 50 MPa 压力的时间变化明显。这说明,端面封堵只影响星孔棒状发射药的燃烧及能量释放过程,并不影响其总能量,封堵片对星孔棒状发射药燃烧规律的影响,主要集中在封堵片燃烧完以前,也就是破孔以前,封堵层越厚,燃烧时破孔越晚,低压下燃烧时间明显越长。

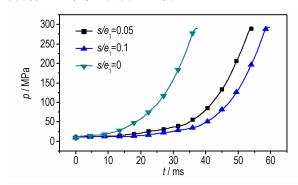


图 3 三种不同端面封堵厚度/发射药弧厚( $s/e_1$ )比的发射药样品的 p-t 曲线

**Fig. 3** The *p-t* curves of three gun propellant samples with different  $s/e_1$  ratios

表 2 三种不同端面封堵厚度的发射药样品的 p-t 曲线燃烧特征点 **Table 2** Combustion characteristic points of the p-t curves of three gun propellant samples with different  $s/e_1$  ratios

s/e <sub>1</sub>	t <sub>50</sub> /ms	t <sub>K</sub> /ms	t <sub>K</sub> -t <sub>50</sub> /ms	P <sub>m</sub> /MPa
0	18.6	37.1	18.5	290.0
0.05	35.0	54.3	19.3	290.1
0.1	40.2	59.0	18.8	292.1

Note:  $s/e_1$  is the ratio of sealing layer thickness to web size,  $t_{50}$  is the combustion time when p is 50 MPa,  $t_{\rm k}$  is the combustion time at the maximum pressure,  $p_{\rm m}$  is the maximum bore pressure.

L-B 曲线反映了气体生成量与火药已燃百分数的关系。图 4 为不同端面封堵厚度样品的 L-B 曲线,由图 4 可见,经端面封堵后,L-B 曲线显示了明显的降低起始燃烧活性和燃烧破孔特征,且破孔后体现出与基体发射药相似的燃烧特征。s/e<sub>1</sub>分别为 0.05、0.1 时,星孔棒状

发射药的起始气体生成量降低了约 1/2; s/e,分别为 0.05、0.1 时,破孔时间约为火药已燃份数的 10% ~ 20%,且随着 s/e,的增加,破孔时间略微延后;由于 s/e,分别为 0.05、0.1 时,封堵层厚度相对燃烧层厚度仍较小,且破孔条件复杂,在破孔时间上体现不出明显区别,可以通过增加封堵层厚度进一步改善和控制燃烧规律。在 L-B 曲线上,还可以看出,星孔棒状发射药的燃烧分裂大约发生在已燃份数达到 90%以上时,其分裂后的减面燃烧性能对整体燃烧影响较小。从上面的分析可知,封堵层的厚度对星孔棒状发射药的燃烧性能有着重要影响,随着封堵层厚度的增加,燃烧的渐增性越强。所以,选择合适的封堵层厚度,就能得到所需要的破孔规律和气体生成规律,实现最佳的弹道效果。

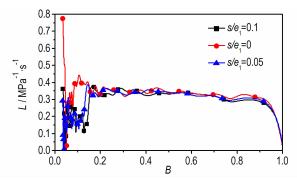


图 4 三种不同端面封堵厚度/发射药弧厚比的星孔棒状发射 药样品的 *L-B* 曲线

**Fig. 4** The *L-B* curves of three star-hole stick gun propellant samples with different  $s/e_1$  ratios

# 3.3 装药内弹道性能

表 3 是大弧厚六翼星孔棒状发射药结合某大口径 火炮进行的内弹道性能实验结果, $\omega$  为装药量,q 为弹重, $p_m$ 为铜柱测得的最大膛压, $v_{32.5}$  为离炮口 32.5 m处测得的弹丸初速。由表3可见,端面封堵可以有效 改善发射药内弹道性能。当  $s/e_1$  分别为 0.05、0.1 时,随封堵层厚度的增加,最大膛压 $p_m$  分别下降了 1.3% 和3.5%,而初速 $v_{32.5}$  分别提高了0.28% 和

表 3 内弹道实验的结果

 Table 3
 Results of internal ballistic tests

$s/e_1$	ω /kg	q /kg	р <sub>т</sub> /MPa	$v_{32.5}$ /m • s <sup>-1</sup>
0	9.8	50	310.0	769.6
0.05	10	50	306.0	771.8
0.1	10.14	50	299.0	780.3

Note:  $s/e_1$  is the sealing layer thicknesses/gun propellant web size ratio;  $\omega$  is the charge quantity; q is the weight of projectile;  $p_{\rm m}$  is the maximum bore pressure;  $v_{32.5}$  is the initial speed of projectile measured at 32.5 m from gun muzzle.

1.4%。封堵层厚度是调控星孔棒状发射药燃烧过程的重要参数,它不仅影响发射药燃烧性能,而且还影响其装药的弹道性能。不同火炮需根据其具体结构及弹道指标要求,选择星孔装药结构及封堵层厚度。

### 4 结 论

- (1)大弧厚六翼星孔棒状发射药燃烧稳定,呈平行层燃烧,可通过调整长径比和封堵层厚度来改善星孔棒状发射药的燃烧规律。
- (2)大弧厚六翼星孔棒状发射药的燃烧性能受长径比影响较大,随着长径比的增加,发射药起始燃气生成猛度降低,最大压力点迟后,长径比 L/D 由 1 增加至 6 时,燃烧渐增性因子 P<sub>r</sub>由 0.285 增加至 0.447,增加 56.8%,而且最大压力点滞后。
- (3)经端面封堵后,降低了六翼星孔棒状发射药的起始燃烧猛度,并表现出明显的破孔燃烧特征。 s/e<sub>1</sub>分别为 0.05、0.1 时,星孔棒状发射药的起始气体生成量降低了约 1/2,破孔时间约为火药已燃分数的 10%~20%,端面封堵后可提高装药内弹道性能。

#### 参考文献:

- [1] 金长荣,王泽山,等.火炸药理论与实践[M].中国北方化学工业总公司,2001:396-398.
- [2] 王泽山,徐复铭,张豪侠,等.火药装药设计原理[M].北京:兵器工业出版社,1995:122-124.
- [3] 王泽山. 发射药技术的展望[J]. 华北工学院学报(社科版), 2001(增刊): 36-40. WANG Ze-shan. Development and prospect of propellant techniques[J]. *Jouranl of North China Institute of Technology( Social Sciences*), 2007(Suppl.): 36-40.
- [4] Michael GLeadore. Mechanical properties of aerojet, thiokol, and JA2 high energy gun propellants at 1.5m/s deformation rate[R]

- 10-14ADA 399116,2002,6.
- [5] 张江波,杨艳,张玉成,等. 某新型发射药在身管附加装药中的应用研究[J]. 含能材料,2010,18(2):192-195. ZHANG Jiang-bo, YANG Yan, ZHANG YU-cheng, et al. Aplication of a new gun propellant in barrel additional charge[J]. Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao),2010,18(2):192-195.
- [6] 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.
- [7] 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 and Gun Propellants, 2015, 38(2): 89-92.
- [8] Ermolaev B S, Romankov A V, Sulimov A A, et al. Compacted modified propellant blocks as traveling charge in the hybrid shot scheme
  [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2014, 6: 881–889.
- [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. Conception and principle of controlled burning gun propellant[J]. Chinese Journal of Explosives and Gun Propellants, 2009, 32(5): 71-74.
- [10] 路建伟, 臧华磊. 小口径高炮弹幕反导技术研究[J]. 火炮发射与控制学报, 2008(3): 10-14.

  LU Jian-wei, ZANG Hua-lei. The barrage contra-missiles technological research of the small caliber antiaircraft gun[J]. Journal of Gun Launch & Control, 2008(3): 10-14.
- [11] 金志明. 枪炮内弹道学[M]. 北京: 北京理工大学出版社. 2007: 24-34.

  JIN Zhi-ming. Interior Ballistics of Guns[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2007: 24-34.
- [12] 谢列伯梁柯夫. 内弹道学[M]. 中国人民解放军军事工程学院出版.1954: 149-162.
- [13] 张柏生. 炮药侵蚀燃烧的理论分析[J]. 华东工学院学报, 1986 (2): 73-87.

  ZHANG Bai-sheng. Theoretical analysis of the gun propellant erosive burning[J]. *Journal of East China Institute of Technology*, 1986(2): 73-87.

# Combustion Characteristics of Seraph Star-hole Gun Propellant with Large Web Size

# JIA Yong-jie, YANG Jian-xing, SHI Xian-rui, CUI Peng-teng

(Xi'an Modern Chemistry Research Institure, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** A new seraph star-hole stick gun propellant with large web size was designed and prepared. The combustion characteristics of the star-hole stick gun propellants with different ratios of length to diameter (L/D=1, 2, 6) and different sealing layer thicknesses/gun propellant web size ratios ( $s/e_1=0$ ,0.05,0.1) were studied by closed bome and combined with a large caliber gun, the experimental verification was performed. Results show that the combustion of the star-hole propellant is stable, revealing a parallel layer combustion. When the L/D increases from 1 to 6, the progressive combustion factor  $P_r$  increases by 56.8% from 0.285 to 0.447, and the maximum pressure point delays. The L-B curves of end plane plugging propellants display obvious low initial combustion activity and hole breaking combustion. When the  $s/e_1$  increases from 0 to 0.05 and 0.1, the initial gas generaation quantity of the star-hole stick gun propellant were reduced by about 1/2, and the hole breaking times were between the burning time needed to burn 10% to 20% (burned fraction) propellants. Selecting appropriate thicknesses of the plugging layers can realize the controllable regulation of the gas generation law of the propellants. When the  $s/e_1$  increases from 0 to 0.05 and 0.1, the maximum bore pressure  $p_m$  decreases by 1.39% and 3.59% respectively, however, the initial speed of projectile at 32.5 m from gun muzzle increases by 0.28% and 1.4%, respectively.

**Key words:** star-hole stick gun propellant; ratio of length to diameter; end plane plugging; combustion characteristics; interior ballistic performance

CLC number: TJ55; O64

Document code: A

**DOI**: 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.09.004