

文章编号: 1006-9941(2014)02-0251-05

# 部分切口多孔杆状发射药的燃烧性能

徐汉涛, 肖正刚, 何卫东

(南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 部分切口多孔杆状发射药可明显提高装药的装填密度, 合适的切口参数是保持部分切口多孔杆状发射药良好燃烧渐增性的关键之一。为了获得合适的切口参数, 设计并制备了不同弧厚、异向切口间隙、同向切口间距和切口宽度的 19 孔杆状发射药, 进行了密闭爆发器试验, 研究了切口参数对发射药定容燃烧性能的影响, 并和相应的多孔粒状药燃烧性能进行了比较。结果表明: 具有合适切口距的部分切口多孔长杆状发射药可以获得和相同药型的多孔粒状药相近的静态燃烧性能; 本研究药型条件下, 同向切口间距小于 20 mm 时, 发射药的渐增性燃烧表现较佳, 侵蚀燃烧不明显。

**关键词:** 材料学; 多孔杆状发射药; 部分切口; 装填密度; 渐增性; 密闭爆发器试验

**中图分类号:** TJ55

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2014.02.025

## 1 引言

高装填密度装药技术是提高火炮弹道性能的最有效途径之一, 其效果已得到了证实<sup>[1-5]</sup>。良好的燃烧渐增性是装填密度装药应用的保证。多孔粒状发射药是目前应用较广泛的发射药之一, 它具有良好的燃烧渐增性, 但装填密度难以获得较大的提高, 点传火性能不佳。采用部分切口多孔杆状发射药可在保持多孔粒状发射药良好的燃烧渐增性的同时, 有效提高发射药装填密度, 改善其点火一致性。美国 Carl<sup>[6]</sup> 等对部分切口多孔杆状发射药的效能进行了研究, 在 155 mm 火炮使用部分切口杆状药、高能发射药和增加装药量  $m_p$  的情况下, 与 M203 粒状 8 号标准装药相比, 在最大膛压  $p_m$  相同时初速提高了 6%。

切口宽度(同一切口两切面之间的距离)和切口间距对部分切口多孔杆状发射药的燃烧性能产生重要影响。研究表明: 侵蚀燃烧现象可能是导致多孔发射药未出现渐增燃烧的重要原因<sup>[7]</sup>。谢列伯梁柯夫<sup>[8]</sup> 用窄孔燃烧理论对发射药燃烧形成双锥喇叭状的原因进行了分析, 张柏生<sup>[9]</sup> 在研究炮药的侵蚀燃烧后认为气流效应是发射药产生侵蚀燃烧的关键, 是最主要的

因素。从工艺和力学性能角度来说, 希望杆状发射药具有较大的切口间距和较小的切口宽度, 但随着发射药切口间距的增加和切口宽度的减小, 多孔长杆状发射药侵蚀燃烧现象加大, 燃烧渐增性下降, 甚至会造成杆状药的破裂, 导致弹道性能下降, 影响发射安全性。因此, 选取合适的切口间距, 掌握内孔径与这些参数的关系就成为部分切口多孔杆状发射药研究的关键<sup>[10]</sup>。

本研究设计并制备了不同弧厚、不同切口宽度和切口间距的 19 孔杆状发射药, 进行了密闭爆发器试验, 研究了切口参数对发射药定容燃烧性能的影响, 并与相应的多孔粒状药燃烧性能进行了比较, 为部分切口多孔杆状发射药的设计和应用提供了基础。

## 2 实验部分

### 2.1 样品制备

本研究以太根发射药为原料, 其各成分含量如下: 硝化棉 66.4%, 硝基甘油 24.8%, 硝化二乙二醇 7.8%, 其它 1%。经过烘箱驱水、捏合机捏合、油压机压伸成型, 得到较长的 19 孔杆状药 (>30 cm)。之后根据需求, 制成长 8 cm, 不同切口间距和切口宽度的部分切口杆状发射药, 为了比较, 还制备了相应的粒状发射药。部分切口方式如下: 首先, 沿垂直于长杆状发射药轴向进行切口, 切至截面圆心位置; 然后, 将长杆状发射药轴向旋转 180°, 移动一定的距离, 沿垂直于长杆状发射药轴向方向进行切口, 切至截面圆心位置。如图 1 所示, a 是指杆状发射药的一个切口与沿

收稿日期: 2013-06-21; 修回日期: 2013-10-08

作者简介: 徐汉涛(1988-), 男, 硕士研究生, 主要从事发射药配方及工艺研究。e-mail: yan030379@163.com

通信联系人: 何卫东(1962-), 男, 副研究员, 主要从事发射药配方及装药设计研究。e-mail: hewedong@mail.njust.edu.cn

其轴向旋转 180° 相邻切口的最小距离,  $b$  是指杆状发射药沿轴向同一侧相邻两切口之间的间距。制备的发射药药型尺寸如表 1 所示。

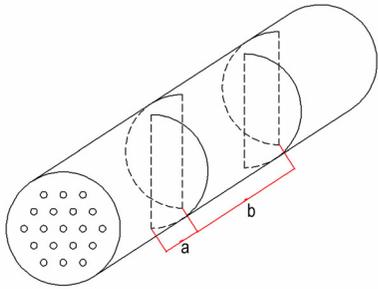


图 1 部分切口多孔发射药切口方式示意图

a—异向切口间隙, b—同向切口间距

Fig. 1 Illustration of the ways of cutting of the partially cut multiperforated stick propellant

a—incongruous incision intervals, b—synclastic incision intervals

表 1 实验用发射药药型尺寸

Table 1 Propellant size for experiments

number	propellant	propellant web /mm	length /mm	synclastic cision intervals /mm	in-incongruous incision intervals /mm	incision web /mm
1 <sup>#</sup>	7/19	0.84	80	\	\	\
2 <sup>#</sup>	7/19	0.84	80	8	3	0.1
3 <sup>#</sup>	7/19	0.84	80	16	3	0.1
4 <sup>#</sup>	7/19	0.84	80	20	3	0.1
5 <sup>#</sup>	7/19	0.84	80	20	5	0.1
6 <sup>#</sup>	7/19	0.84	80	20	7	0.1
7 <sup>#</sup>	7/19	0.84	80	40	3	0.1
8 <sup>#</sup>	7/19	0.84	20	\	\	\
9 <sup>#</sup>	12/19	1.44	80	20	3	0.1
10 <sup>#</sup>	12/19	1.44	80	20	3	1
11 <sup>#</sup>	12/19	1.44	80	\	\	\

## 2.2 密闭爆发器试验

本研究使用的密闭爆发器容积为 200 mL。试验条件为装填密度为  $0.12 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  (7/19 药型) 和  $0.18 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  (12/19 药型), 实验温度  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , 点火药是  $2.0 \text{ g}$  2<sup>#</sup> 硝化棉, 点火压力  $10.98 \text{ MPa}$ 。

## 3 结果分析与讨论

### 3.1 同向切口间距对发射药燃烧性能的影响

图 2、图 3 分别为异向切口间隙为 3 mm、切口宽度为 0.1 mm 时不同同向切口间距 (2<sup>#</sup>, 3<sup>#</sup>, 4<sup>#</sup>, 7<sup>#</sup>) 和未切口 (1<sup>#</sup>) 的 7/19 杆状发射药的  $L-B$  曲线和  $u-p$  曲线, 其中  $u-p$  曲线最高压力以后部分是软件处理造成, 并非实

验真实情况。由图 2 可以看出, 当  $B$  为  $0 \sim 0.1$  时, 1<sup>#</sup> 和 7<sup>#</sup> 发射药的  $L-B$  曲线明显高于 2<sup>#</sup>, 3<sup>#</sup>, 4<sup>#</sup> 发射药的  $L-B$  曲线, 表明, 2<sup>#</sup>, 3<sup>#</sup>, 4<sup>#</sup> 发射药起始燃烧相对较慢, 气体生成量少。由图 3 可以看出, 在发射药刚开始燃烧阶段, 1<sup>#</sup> 和 7<sup>#</sup> 发射药燃速较大, 有较高的尖峰, 然后燃速出现一个下降的过程, 之后燃速以一个较慢的速度随压力的增大而升高; 而 2<sup>#</sup>, 3<sup>#</sup>, 4<sup>#</sup> 发射药的燃速一直随压力的增大而升高, 具有与多孔粒状发射药相似的燃烧特征。1<sup>#</sup> 和 7<sup>#</sup> 发射药起始燃速较大的原因是在发射药开始燃烧阶段未切口和切口间距太长均会致使燃烧产生的大量高压气体不能及时地从内孔中排出, 孔内压力升高、燃速增加和由于侵蚀燃烧引起发射药燃面增加的结果。同时, 计算时仍按平行层燃烧处理的方法也带来了与实际燃面变化情况的差异。说明在同向切口间距小于 20 mm 时, 发射药渐增性燃烧表现较侵蚀燃烧不明显。

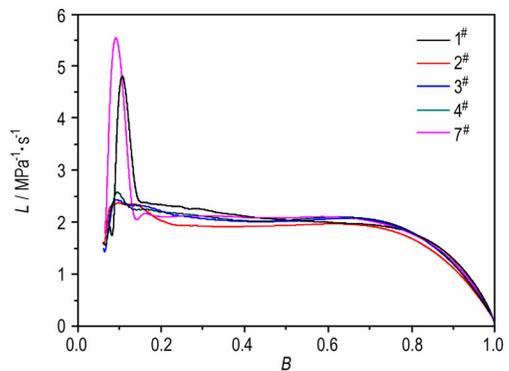


图 2 不同同向切口间距发射药的  $L-B$  曲线

Fig. 2  $L-B$  curves of propellant with different synclastic incision intervals

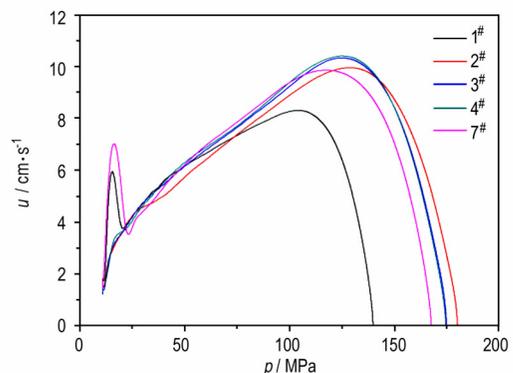


图 3 不同同向切口间距发射药的  $u-p$  曲线

Fig. 3  $u-p$  curves of propellant with different synclastic incision intervals

### 3.2 异向切口间隙对发射药燃烧性能的影响

图 4 ~ 图 6 分别为同向切口间距为 20 mm、切口宽度为 0.1 mm 时不同异向切口间隙的 7/19 杆状发射药

(4<sup>#</sup>,5<sup>#</sup>,6<sup>#</sup>)的  $p-t$  曲线、 $L-B$  曲线和  $u-p$  曲线。由图 4 可以看出,随着异向切口间隙的变化,发射药的燃烧时间没有发生明显变化。由图 5、图 6 可以看出,随着异向切口间隙的增大(4<sup>#</sup>,5<sup>#</sup>,6<sup>#</sup>),曲线前期的  $L$  值略有增加,异向切口间隙对燃速影响较小。总体来说,异向切口间隙对发射药燃烧性能的影响较小。为降低部分切口多孔杆状发射药装药横向断裂对燃烧性能的影响,在保证杆状药力学性能的情况下,异向切口间隙越小越好。

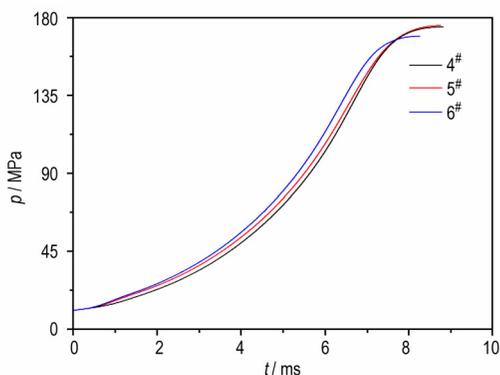


图 4 不同异向切口间隙发射药  $p-t$  曲线

Fig. 4  $p-t$  curves of propellant with different incongruous incision intervals

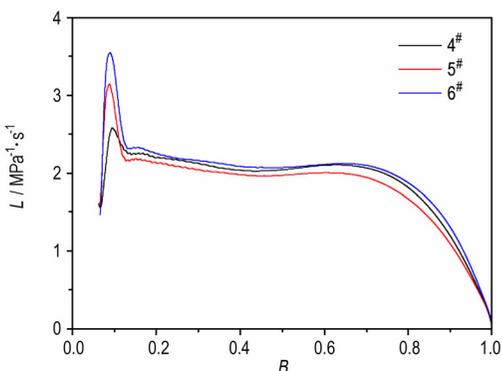


图 5 不同异向切口间隙发射药  $L-B$  曲线

Fig. 5  $L-B$  curves of propellant with different incongruous incision intervals

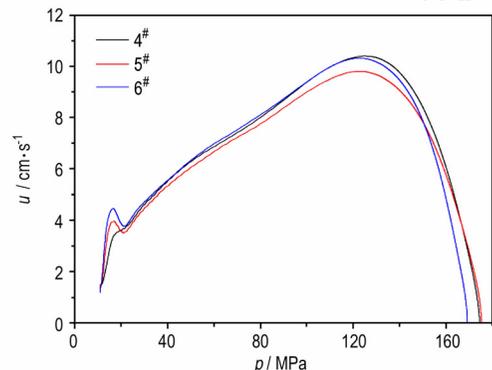


图 6 不同异向切口间隙发射药  $u-p$  曲线

Fig. 6  $u-p$  curves of propellant with different incongruous incision intervals

### 3.3 切口宽度对发射药燃烧性能的影响

图 7 ~ 图 9 分别为同向切口间距为 20 mm、异向切口间距为 3 mm 时不同切口宽度(9<sup>#</sup>,10<sup>#</sup>)和未切口(11<sup>#</sup>)的 12/19 杆状发射药的  $p-t$  曲线、 $L-B$  曲线和  $u-p$  曲线。

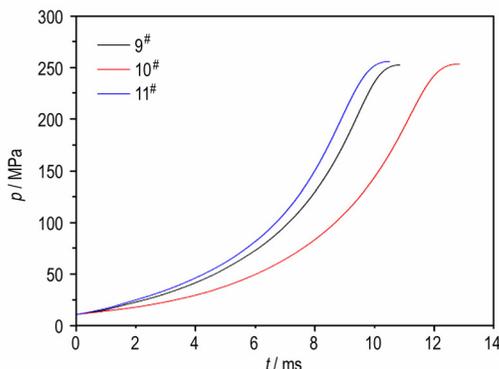


图 7 不同切口宽度发射药  $p-t$  曲线

Fig. 7  $p-t$  curves of different incision width

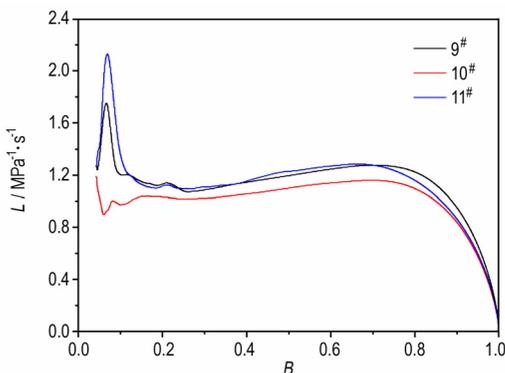


图 8 不同切口宽度发射药  $L-B$  曲线

Fig. 8  $L-B$  curves of different incision width

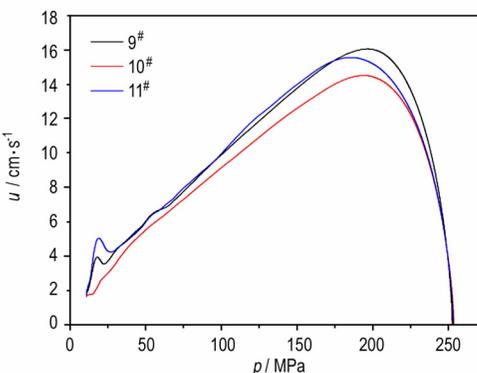


图 9 不同切口宽度发射药  $u-p$  曲线

Fig. 9  $u-p$  curves of different incision width

从图 7 可以看出,10<sup>#</sup>发射药燃烧较慢,其次是 9<sup>#</sup>发射药,而 11<sup>#</sup>发射药燃烧最快。由图 8、图 9 可以看

出, 11<sup>#</sup>发射药侵蚀燃烧现象最严重, 9<sup>#</sup>发射药次之, 10<sup>#</sup>发射药最小。表明: 切口宽度对发射药燃烧有一定的影响, 随着切口宽度的增加, 侵蚀燃烧现象减弱。在保证发射药装填密度和力学性能的前提下, 切口宽度可适当增加以保证良好的燃烧性能。对比 3.1、3.2 的研究结果, 在同向切口间距小于 20 mm 的情况下, 0.1 mm 切口宽度已可以获得较好的燃烧性能。

### 3.4 粒状药与药长 80 mm 部分切口杆状药的静态燃烧性能比较

图 10、图 11 分别为药长为 20 mm 的 7/19 粒状药 (即粒状药) (8<sup>#</sup>) 与同向切口间距为 20 mm、异向切口间距为 3 mm、药长为 80 mm 的 7/19 杆状发射药 (即切口药) (4<sup>#</sup>) 的  $L-B$  曲线和  $u-p$  曲线。

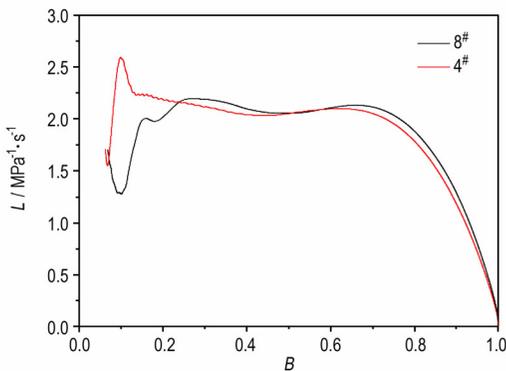


图 10 粒状药与切口药的  $L-B$  曲线

Fig. 10  $L-B$  curves of granular and part-cut propellants

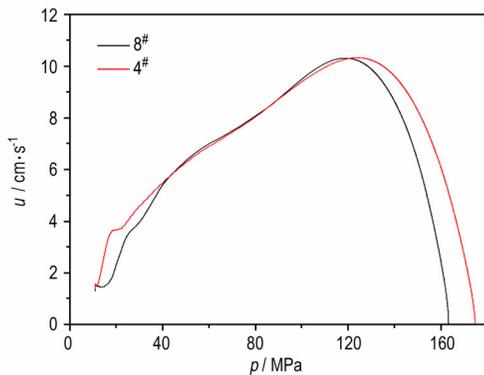


图 11 粒状药与切口药的  $u-p$  曲线

Fig. 11  $u-p$  curves of granular and part-cut propellants

从图 10、图 11 可以看出, 粒状药与药长 80 mm 的 7/19 杆状发射药具有相似的燃烧性能。

## 4 结论

(1) 利用密闭爆发器, 可以对部分切口多孔杆状发射药侵蚀燃烧现象进行研究, 确定不发生明显侵蚀

燃烧的最大切口距和合适的切口宽度等切口参数。具有合适切口距的部分切口多孔长杆状发射药可以获得和相同药型的多孔粒状药相近的静态燃烧性能。

(2) 不同的同向切口间距对发射药的燃烧产生显著影响。在本实验条件下, 部分切口杆状发射药同向切口间距小于 20 mm 时, 发射药的渐增性燃烧表现较好, 侵蚀燃烧不明显。

(3) 异向切口间距对发射药燃烧产生的影响不明显, 随着切口宽度的增加, 侵蚀燃烧现象减弱。为降低部分切口多孔杆状发射药装药横向断裂对燃烧性能的影响, 在保证杆状药力学性能的情况下, 异向切口间距越小越好。

### 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: 219-221.  
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: 219-221.
- [2] CHANG Lang-mann. Ballistic effects of ignition stimulus in high-performance tank ammunition[R]. AD-A310 233, 1996, 5.
- [3] 金志明. 现代火炮推进技术述评及建议[J]. 弹道学报, 1993, (4): 78-94.  
JIN Zhi-ming. Some suggestions and reviews on modern gun propulsion[J]. *Journal of Ballistics*, 1993, (4): 78-94.
- [4] 王琼林. 国外枪炮发射药技术发展概况[J]. 火炸药学报, 1998, 21(4): 54-58.  
WANG Qiong-lin. The development situation in foreign gun propellant technology[J]. *Chinese Journal of Explosives & Explosives*, 1998, 21(4): 54-58.
- [5] 李峰, 张振铎. 密实发射药装药技术研究[J]. 弹道学报, 1992 (1): 77-81.  
LI Feng, ZHANG Zhen-duo. The research of technology of intensive charge[J]. *Journal of Ballistics*, 1992, (1): 77-81.
- [6] Carl R R, Frederick W R, Thomas C M, et al. A new high-progressivity/high-density propulsion concept: partially cut multi-perforated stick propellant[R]. AD-A234 255, 1991, 3.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 王泽山, 欧育湘, 任务正. 火炸药科学技术[M]. 北京: 北京理工大学出版社. 2005: 228-230.  
WANG Ze-shan, OU Yu-xiang, REN Wu-zheng. The science and technology of explosives[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2005: 228-230.

## Combustion Characteristics of Partially Cut Multiperforated Stick Propellant

XU Han-fao, XIAO Zheng-gang, HE Wei-dong

(School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** In order to obtain the appropriate incision parameters, stick propellant of 19 holes with different web, synclastic incision intervals, incongruous incision intervals and incision web were prepared and studied by closed-bomb test. The influence of incision parameters on constant volume combustion performance was studied and compared with that of porous granular propellant. Results show that the partially cut multiperforated long stick propellant with proper incisions can obtain similar static combustion performance with the granular propellant. In this study, the progressive burning is good and erosion burning is not obvious when synclastic incision intervals is less than 20 mm.

**Key words:** Materials; multiperforated stick propellant; partially cut; loading density; progressive; closed-bomb test

**CLC number:** TJ55

**Document code:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2014.02.025