

文章编号: 1006-9941(2017)01-0039-05

# 横切棒状和包覆粒状发射药混合装药定容燃烧性能

徐前, 何卫东

(南京理工大学化工学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 为了研究横切棒状和包覆粒状发射药混合装药的定容燃烧性能, 制备了 9/19 的横切棒状药和含有  $\text{TiO}_2$  的高分子阻燃太根 7/19 包覆粒状发射药, 对不同混合配比的横切棒状药和包覆粒状发射药进行了密闭爆发器试验, 测定了发射药在不同装填密度下的定容燃烧性能, 研究了混合比对混合装药定容燃烧性能的影响规律, 分析了横切棒状药和包覆粒状发射药共同燃烧相互作用。结果表明: 装填密度对发射药混合装药定容燃烧性能产生影响, 随着装填密度增加, 侵蚀燃烧降低, 燃烧渐增性增加。混合比例对混合装药燃烧渐增性产生影响, 在装填密度为  $0.20 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  和  $0.32 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  条件下, 横切棒状和包覆粒状发射药获得较佳燃烧渐增性的混合比例分别为 4:6 和 3:7。横切棒状药和包覆粒状发射药混合装药燃烧的相互影响主要表现在燃烧前期, 横切棒状药改善了包覆粒状发射药的点火; 燃烧中后期, 横切棒状药和包覆粒状发射药燃烧趋于独立。

**关键词:** 混合装药; 定容燃烧; 燃烧渐增性

中图分类号: TJ55

文献标志码: A

DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.01.006

## 1 引言

高初速、远射程是身管武器的主要发展方向, 为了提高火炮初速, 要求发射装药具有高的能量<sup>[1]</sup>。高能、高装填密度发射药应用是提高发射装药能量的主要技术途径<sup>[2-3]</sup>。

横切棒状药(又称部分切口多孔杆状发射药)具有装填密度高<sup>[4]</sup>、点传火性能好、燃烧渐增性好的特点, 具有广泛的应用前景。但随着装填密度的增加, 最大膛压也相应地增加, 为保证膛压不超过火炮可承受的范围, 需要进一步提高发射装药燃烧渐增性。包覆发射药具有较多孔火药更高的燃烧渐增性, 采用横切棒状药和包覆粒状发射药混合装药, 可以在保持装药较高装填密度的同时, 获得高的燃烧渐增性。对横切棒状药、包覆发射药、粒状发射药燃烧性能, 已分别开展了较多的研究工作, 徐汉涛<sup>[5]</sup>等研究了不同切口的杆状药的燃烧性能, 研究表明, 具有合适切口距的部分切口多孔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。薛幂祎<sup>[6]</sup>等研究了钝感球扁药和主装药混合的燃烧性能, 结果表明, 其包覆钝感技术可以改善混合装药燃烧渐增性。王锋<sup>[7]</sup>等研究了部分切口多孔杆状发射药燃烧性能, 证明了其燃烧渐增性比粒状发射药好。F W Robbins<sup>[8]</sup>研究表明其与粒状药相比, 横切棒状药具有更低膛压和更高的初速。Carl<sup>[9]</sup>研究表明横切棒状药在 155 mm 火炮上应用, 使火炮保持最大膛压的同时初速提高了 6%。但未见横切棒状药和包覆粒状发射药混合装药的燃烧性能研究的报道。

本研究针对太根横切棒状药和具有阻燃效果包覆粒状发射药, 在不同装填密度下, 对它们的不同比例的混合装药的定容燃烧性能进行研究, 并分析发射药混合装药的燃烧相互作用。

## 2 实验部分

### 2.1 样品制备

按制式太根发射药配方, 经过捏合、压伸、切药、驱溶等常规发射药制备工序制成 9/19 梅花型横切棒状药发射药(PC)和 7/19 的粒状发射药, 然后对粒状药(7/19)表面用含  $\text{TiO}_2$  的高分子阻燃包覆材料在转鼓包覆设备中进行包覆处理, 制备成含有  $\text{TiO}_2$  的包覆粒状发射药。其中横切棒状药(9/19)药型尺寸: 异向切口, 切口距 20 mm, 内径 0.25 mm, 弧厚 0.95 mm, 切

收稿日期: 2016-04-25; 修回日期: 2016-12-14

基金项目: 国家重点基础研究 973 项目(613226)

作者简介: 徐前(1991-), 男, 硕士研究生, 主要从事发射药装药设计研究。e-mail: yao11xutt@126.com

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

口深度 1/2 直径; 粒状发射药(7/19)药型尺寸: 药长 7.48 mm, 内径 0.24 mm, 弧厚 0.80 mm, 制备了包覆粒状发射药(DCPC): 包覆层中  $\text{TiO}_2$  含量为 30%, 包覆量为 20%。

## 2.2 密闭爆发器试验

密闭爆发器容积为  $107 \text{ cm}^3$ , 装填密度分别为  $0.20 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  和  $0.32 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , 点火药  $\text{C}^\# \text{ NC } 1.1 \text{ g}$ , 点火压力  $10.98 \text{ MPa}$ , 测得混合装药的发射药压力-时间( $p-t$ )曲线, 经过处理得到相对活度-相对燃烧量( $L-B$ )曲线。

表 1 密闭爆发器试验方案

Table 1 Different schemes of closed-bomb tests

| No             | propellants(mixed mass ratio) | loading density/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ |
|----------------|-------------------------------|--|
| 1 <sup>#</sup> | PC                            |  |
| 2 <sup>#</sup> | DCPC                          | 0.32   |
| 3 <sup>#</sup> | PC/DCPC(3 : 7)                |  |
| 4 <sup>#</sup> | PC/DCPC(4 : 6)                |  |
| 5 <sup>#</sup> | PC/DCPC(8 : 2)                |  |
| 6 <sup>#</sup> | DCPC                          | 0.20   |
| 7 <sup>#</sup> | PC                            |  |
| 8 <sup>#</sup> | PC/DCPC(4:6)                  |  |
| 9 <sup>#</sup> | PC/DCPC(8:2)                  |  |

## 3 结果与讨论

### 3.1 装填密度对混合装药定容燃烧性能的影响

#### 3.1.1 装填密度为

1<sup>#</sup>~5<sup>#</sup>样品的混合装药燃烧的相对活度-相对燃烧量( $L-B$ )曲线如图 1 所示。1<sup>#</sup>~5<sup>#</sup>相应的  $L-B$  曲线渐增性燃烧特征量见表 2。

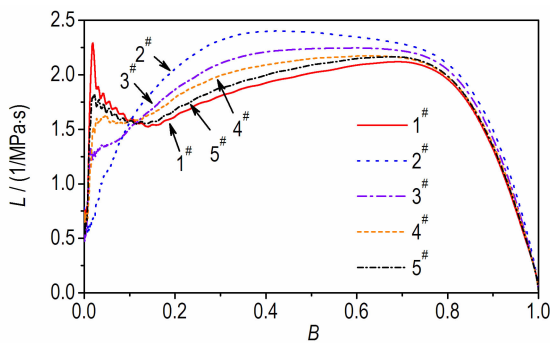


图 1 1<sup>#</sup>~5<sup>#</sup>样品的  $L-B$  曲线

Fig.1  $L-B$  curves of 1<sup>#</sup>-5<sup>#</sup> samples

从图 1 可以看出: 单一横切棒状药(1<sup>#</sup>)的起始活度大, 相对活度( $L$ )先快速上升, 出现了燃烧尖峰。随着燃烧的进行, 活度变化表现为先下降后上升, 表明发

射药燃烧初期发生了明显的侵蚀燃烧现象<sup>[10]</sup>。而单一包覆粒状发射药(2<sup>#</sup>)的起始活度小, 活度逐渐升高, 上升速度较缓慢。这主要由于它的包覆层表面阻燃, 降低了包覆粒状发射药起始燃速, 同时, 由于包覆层的堵孔作用, 初期内孔不燃烧, 消除了起始侵蚀燃烧现象。对于混合装药, 随着混合装药中包覆粒状发射药的比例增加, 燃烧侵蚀峰渐渐减小。表明: 包覆粒状发射药有明显降低起始燃烧尖峰的效果。随着包覆层的破裂和逐渐燃尽, 包覆粒状发射药内孔开始燃烧, 燃面增大, 表现出良好的燃烧渐增性。

表 2 发射药样品的  $L-B$  曲线燃烧渐增性特征量

Table 2  $L-B$  curves progressive combustion characteristics of propellants

| No.            | $B_0$ | $L_0$ | $B_m$ | $L_m$ | $L_m/L_0$ |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| 1 <sup>#</sup> | 0.050 | 1.155 | 0.692 | 2.120 | 1.835     |
| 2 <sup>#</sup> | 0.050 | 1.173 | 0.426 | 2.402 | 2.048     |
| 3 <sup>#</sup> | 0.050 | 1.030 | 0.494 | 2.293 | 2.227     |
| 4 <sup>#</sup> | 0.050 | 1.027 | 0.598 | 2.246 | 2.188     |
| 5 <sup>#</sup> | 0.050 | 1.063 | 0.681 | 2.165 | 2.036     |
| 6 <sup>#</sup> | 0.050 | 1.287 | 0.513 | 2.422 | 1.882     |
| 7 <sup>#</sup> | 0.050 | 1.337 | 0.661 | 2.049 | 1.532     |
| 8 <sup>#</sup> | 0.050 | 1.275 | 0.606 | 2.271 | 1.781     |
| 9 <sup>#</sup> | 0.050 | 1.367 | 0.626 | 2.118 | 1.549     |

Note:  $L_m/L_0$ <sup>[11]</sup> is progressive combustion characteristic,  $L_m$  is maximum activity,  $L_0$  is the average value of  $L$  between  $B=0$  to  $B=0.1$ .

从表 2 和图 1 可以看到混合装药比例为 3 : 7 (3<sup>#</sup>) 的燃烧渐增性特征量较大, 说明该比例下混合装药的燃烧性能好。表明, 并不是混合装药中横切棒状药越多, 燃烧渐增性就越好, 选择合适的横切棒状药和包覆粒状发射药比例, 是混合装药获得更好的燃烧渐增性关键。

#### 3.1.2 装填密度为 $0.2 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 混合比对混合装药燃烧性能影响

6<sup>#</sup>~9<sup>#</sup>混合装药燃烧的相对活度-相对燃烧量( $L-B$ )曲线如图 2 所示。6<sup>#</sup>~9<sup>#</sup>的相对活度-相对燃烧量( $L-B$ )曲线渐增性燃烧特征量见表 2。

从图 2 看出, 与装填密度为  $0.32 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  类似, 发射药燃烧初期, 横切棒状药(7<sup>#</sup>)发生侵蚀燃烧效应, 而包覆粒状发射药(6<sup>#</sup>)由于包覆层阻燃效果而使得燃烧活度曲线缓慢上升, 当混合装药中横切棒状药比例变小时, 起始峰逐渐减小, 侵蚀性燃烧现象减弱, 侵蚀燃烧尖峰渐渐被“削平”, 混合比例为 4 : 6 时, 混合装药(8<sup>#</sup>)的侵蚀燃烧尖峰已基本消失。

结合图2和表2,可以看到,本试验条件下,当装填密度为 $0.2\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 时,在混合装药中,混合比例为4:6的混合装药(8<sup>#</sup>)的燃烧渐增性特征量最大,燃烧渐增性较好。

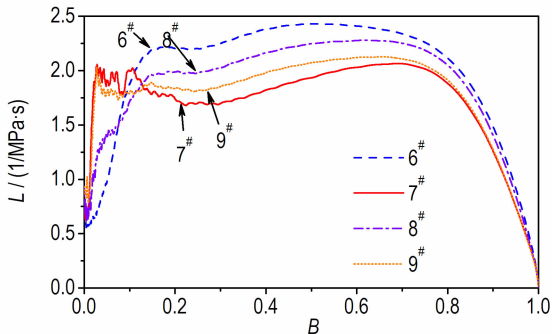


图2 6<sup>#</sup>~9<sup>#</sup>样品的L-B曲线

Fig.2 L-B curves of 6<sup>#</sup>-9<sup>#</sup> samples

### 3.1.3 装填密度对混合装药燃烧性能的影响

综合表2数据,可以看到装填密度为 $0.32\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的混合装药的燃烧性能明显优于装填密度为 $0.2\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的混合装药,燃烧渐增性更好。

从图3a的不同装填密度的相对活度-相对燃烧量(L-B)曲线对比上看到,发射药燃烧的前期阶段,对于单一横切棒状药(1<sup>#</sup>和7<sup>#</sup>)的定容燃烧,装填密度越大的横切棒状装药,它的燃烧起始活度上升越快,因为装填密度越高,产生压力越大,活度越高;但是,另一方面,装填密度越大的横切棒状药活度下降也越快,侵蚀燃烧结束的也越早,从图3a上看到,当B为0.15时,装填密度为 $0.32\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,横切棒状药(1<sup>#</sup>)的侵蚀燃烧结束;当B为0.3时,装填密度为 $0.20\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,横切棒状药(7<sup>#</sup>)的侵蚀燃烧才结束。这是发射药的装填密度越小,侵蚀燃烧更加严重的结果<sup>[11]</sup>。结合图3a和表2得出结论,随横切棒状药的装填密度增加,侵蚀燃烧现象减弱,燃烧渐增性增加。

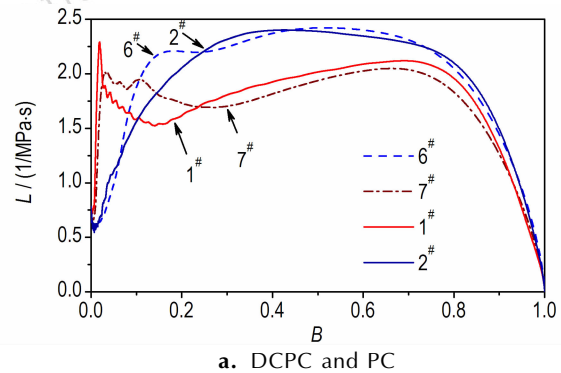
对于单一包覆粒状发射药(2<sup>#</sup>和6<sup>#</sup>)的定容燃烧,装填密度越小,它的起始燃烧活度上升幅度越大,主要原因是破孔前,当达到相同的压力时,高装填密度下燃烧的包覆层厚度必定小于低装填密度下的厚度。因此,当达到相同的压力,发射药在装填密度较小的包覆粒状发射药表面阻燃层燃烧的多,破孔较早,这时,发射药表面破孔发生增面燃烧,相对活度增加,导致曲线上升明显。结合图3a和表2得出结论,随包覆药的装填密度增加,燃烧渐增性增加。

发射药燃烧的后期阶段,不同装填密度下的发射

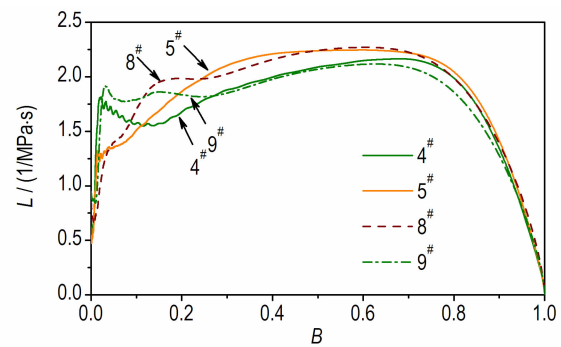
药燃烧相对活度-相对燃烧量(L-B)曲线基本相当,表明不同装填密度对发射药的燃烧后期的影响不大。

对于发射药混合装药(5<sup>#</sup>,8<sup>#</sup>和4<sup>#</sup>,9<sup>#</sup>)的定容燃烧,由图3b可以看到,混合装药的相对活度-相对燃烧量(L-B)曲线是横切棒状药和包覆粒状发射药共同燃烧作用的结果。同样地,随着混合装药的装填密度增加,侵蚀燃烧效应降低,燃烧渐增性增加。

综上,在其他试验条件相同的条件下,发射药的装填密度越大,燃烧渐增性越好。



a. DCPC and PC



b. mixed charge propellants

图3 不同装填密度下的L-B曲线

Fig.3 L-B curves of different loading densities

### 3.2 混合装药的定容燃烧相互作用机理

活度L的变化反映了燃速和燃面对火药气体生成量的综合影响,B反映了火药燃去量的变化。本研究通过拟合计算混合装药独立燃烧时的活度与试验测试的活度对比来表征发射药混合装药的燃烧过程。

以上试验数据表明:混合装药各组份之间的燃烧既有一定的独立性,又相互干扰。为了分析混合装药各组份燃烧的相互作用机理,假设混合装药中横切棒状药和包覆粒状发射药的两组分燃烧是各自独立的,即彼此不影响,那么可以认为混合装药的活度值具有线性加和性。即:

$$L_n = \alpha_1 L_s + \alpha_2 L_c \quad (1)$$

式中, $L_n$ 为拟合计算的活度, $\alpha_1$ 和 $\alpha_2$ 分别是混合装药

中横切棒状药和包覆粒状发射药所占的比值( $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ ),  $L_s$  表示横切棒状药独立燃烧时的活度,  $L_c$  表示包覆粒状发射药独立燃烧的活度。

而实际测试得到的混合装药的燃烧的相对活度-相对燃烧量( $L-B$ )曲线是实际情况下杆状药和包覆药各自燃烧对活度的贡献, 即:

$$L_e = \beta_1 L_s + \beta_2 L_c \quad (2)$$

其中,  $L_e$  为试验的活度,  $\beta_1$  为横切棒状药在某一燃去量时的实际燃烧活度贡献比值,  $\beta_2$  为包覆粒状发射药在某一燃去量时的燃烧活度贡献比值( $\beta_1 + \beta_2 = 1$ )。

通过  $L$  拟合的  $L_n-B$  曲线, 与实际密闭爆发器不同比例的  $L_e-B$  曲线进行对比。

图 4 为 3<sup>#</sup>, 4<sup>#</sup>, 5<sup>#</sup> 的混合装药实验和拟合计算  $L-B$  曲线。

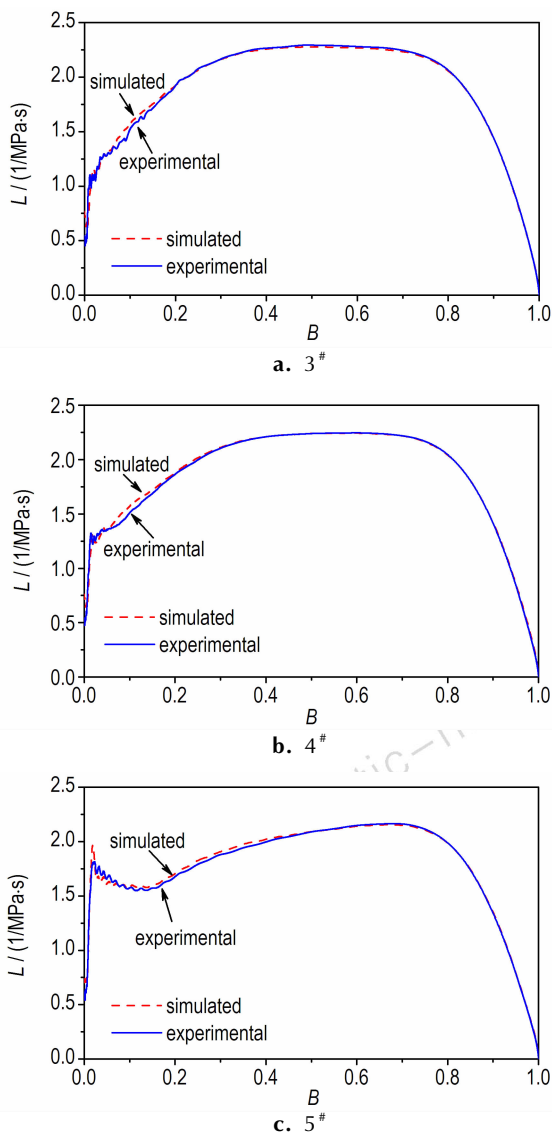


图 4 拟合计算与试验的  $L-B$  曲线比较

Fig. 4 Comparison of simulated and experimental  $L-B$  curves

从图 4 可以看出, 不同混合比例的混合装药定容燃烧规律基本是相似的, 燃烧初期,  $L_n$  的数值大, 即:  $L_e < L_n$ , 由于横切棒状药相对包覆粒状发射药起始燃烧活度大, 因此有,  $\beta_1 < \alpha_1, \beta_2 > \alpha_2$ , 表明横切棒状药燃烧对包覆粒状发射药的燃烧具有影响, 包覆粒状发射药较独立燃烧时对混合装药燃气生成具有更大的贡献, 分析其原因, 横切棒状药燃烧改善了包覆粒状发射药的点火, 使得包覆粒状发射药点火一致性变好, 起始燃面变大, 导致包覆粒状发射药对混合装药燃气生成速率贡献较拟合的大, 横切棒状药对混合装药燃气生成速率贡献较拟合的相应减小, 包覆粒状发射药相对燃烧质量较拟合增加。

混合装药燃烧中后期,  $L_e \approx L_n$ , 即:  $\beta_1 \approx \alpha_1, \beta_2 \approx \alpha_2$ , 实际燃烧横切棒状药与包覆粒状发射药燃烧相互影响小, 燃烧趋于独立。

从图 4 上还可以看出, 随着混合装药中包覆粒状发射药的比例减小, 试验与拟合计算的活度的相差值减小, 进一步证明了混合装药燃烧的相互作用机理。

## 4 结论

(1) 横切棒状药和包覆粒状发射药混合装药可获得良好渐增性, 装填密度对发射药混合装药定容燃烧性能产生影响, 随着装填密度增加, 侵蚀燃烧效应降低, 燃烧渐增性增加。

(2) 混合比例对混合装药燃烧渐增性产生影响, 合适的混合比例是混合装药良好渐增性的保证, 在装填密度为  $0.20 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  和  $0.32 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  条件下, 横切棒状和包覆粒状发射药获得较佳燃烧渐增性的混合比例分别为 4:6 和 3:7。

(3) 横切棒状药和包覆粒状发射药混合装药燃烧的相互影响主要表现在燃烧前期, 横切棒状药改善了包覆粒状发射药的点火, 燃烧中后期, 横切棒状药和包覆粒状发射药燃烧趋于独立。

## 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: 102-103.  
JIN Zhi-ming. Interior ballistics of guns[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2004: 102-103.
- [2] 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: 38-49.  
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: 38-49.
- [3] 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.
- [4] 吕振义, 付荣芝. 棒状发射药[J]. *火炸药*, 1993(2): 27-30.  
LÜ Zhen-yi, FU Rong-zhi. Stick propellant[J]. *Explosive*, 1993 (2): 27-30.
- [5] 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 Hang-tao, XIAO Zhen-gang, HE Wei-dong. Combustion characteristics of partially cut multi-perforated stick propellant [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2014, 22(2): 251-255.
- [6] 薛幂炜, 杭祖圣, 应三九. 钝感球扁药及其混合装药燃烧性能研究[J]. *弹道学报*, 2011, 23(3): 96-99.  
XUE Ao-wei, HANG Zu-sheng, YING San-jiu. Combustion properties of deterrent oblate spherical propellant and mixed charge[J]. *Journal of Ballistics*, 2011, 23(3): 96-99.
- [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 performance of multi-perforated curve-cut stick gun propellant [J]. *Chinese Journal of Explosive & Propellants*, 2015, 38(2): 89-92.
- [8] Carl R R, Robbins F W, Minor T C, et al. A new high-progressivity /high-density propulsion concept: partially cut multi-perforated stick propellant[R]. AD-A, 1991(3): 234-255.
- [9] Robbins F W, Horst A W. Detailed characterization of the interior ballistics of slotted stick propellant[R]. AD-A, 1994: 147-499.
- [10] 张洪林. 侵蚀燃烧在发射装药内弹道中的应用研究[J]. *兵工学报*, 2008, 29(2): 129-133.  
ZHANG Hong-lin. Application research of erosive burn in propellant charge interior ballistics[J]. *Acta Armamentarii*, 2008, 29(2): 129-133.
- [11] 黄振亚, 贾永杰, 崔鹏腾, 等. 叠氮硝酸发射药的燃烧性能调控技术[J]. *含能材料*, 2013, 21(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 Materials (Hanneng Cailiao)*, 2013, 21(6): 795-799.

## Constant-volume Combustion Performance of Mixed Charge of Slotted Stick Propellants and Coated Granular Propellants

XU Qian, HE Wei-dong

(School of chemical engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** In order to study combustion performance of deterrent coated granular propellant and slotted stick propellant with constant volume, 7/19 propellants and 9/19 stick propellants were prepared by coating polymeric flame  $\text{TiO}_2$ . The closed-bomb tests of slotted stick propellant and deterrent coated propellant were carried out, and combustion performance of deterrent coated propellant and mixed charge with constant volume was investigated. The influence of mixed ratio of slotted stick propellant and deterrent coated propellant in different loading densities on combustion was studied. Combustion mechanism of slotted stick propellant and deterrent coated propellant was analyzed. The results show that loading density impacted the combustion of mixed charge, the higher loading density can increase burning progressivity and decrease erosive combustion. In this experiment, the suitable mixed ratio of slotted stick propellant and deterrent coated granular propellant is 4 : 6 and 3 : 7 when loading density is  $0.20 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$  and  $0.32 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ , which can lead to a good combustion progressivity. It was also found that slotted stick propellants and deterrent coated propellants interact seriously in the early stages of combustion. However, as the combustion progresses, the interaction between them gradually weakens.

**Key words:** mixed charge; constant burning; progressive combustion

**CLC number:** TJ55

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.01.006