

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2014.01.009

# 粒状发射药动态破碎研究进展\*

陈言坤<sup>①</sup> 甄建伟<sup>①</sup> 武慧恩<sup>②</sup> 张艳明<sup>①</sup> 罗兴柏<sup>①</sup>

① 军械工程学院弹药工程系(河北石家庄,050003)

② 防化军事代表局驻西宁地区军事代表室(青海乐都,810700)

[摘要] 综述了落锤冲击试验、空气炮试验、分离式霍普金森压杆试验和动态挤压物理仿真试验等在发射药动态破碎研究中的应用状况,介绍了破碎度法、动态活度比法和燃烧渐增因子法等发射药破碎程度的描述方法,并提出建议:在冲击载荷条件下发射药床不同位置药粒的受力特点以及药粒的本构模型和破碎模型还需进一步研究,为描述发射过程中发射药破碎规律提供理论基础。

[关键词] 含能材料;粒状发射药;动态破碎;发射安全性;综述

[分类号] TJ410.6;TQ562

## 引言

随着高膛压、高初速、高装填密度等高性能火炮的不断发展,火炮膛内的燃烧与力学环境越来越恶劣,发射安全性问题愈来愈突出,制约了现代高性能武器弹药的发展<sup>[1-3]</sup>。目前,国内外的理论与实验研究表明:发射过程中膛内发射药的碰撞、挤压引起的发射药粒大量破碎致使初始燃烧面积增大是发射药引起膛炸的根本原因<sup>[4-8]</sup>。当发射药粒的力学性能不能满足膛内强烈冲击载荷而发生大量破碎时,就会引起发射药燃面的急增,从而使燃气生成速率猛增,导致弹道起始段膛压骤增,产生膛炸。因此,研究发射药粒在冲击载荷条件下的动态破碎对于发射药发射安全性评估具有重要意义。有关科技工作者已在这方面做了大量的工作<sup>[9-13]</sup>,本文在已有成果的基础上,综述了发射药动态破碎的研究现状,并对今后的研究提出了展望。

## 1 发射药动态破碎研究手段

发射过程中药粒在膛内所处的力学环境极为复杂,作用时间短,且难以获得破碎药粒,用射击试验方法直接研究发射药在膛内的受力情况和破碎规律是相当困难的。一般采用膛外模拟的方法来研究发射药的动态破碎<sup>[14-15]</sup>。常用研究手段有落锤冲击试验、空气炮试验、分离式霍普金森压杆试验和动态挤压物理仿真试验等。

### 1.1 落锤冲击试验

落锤试验是利用自由落体的速度实现对试件冲击加载,通过调整释放高度以及落锤质量达到预期

的撞击速度或撞击能量,除了自由落体产生的速度以外,还可通过气动辅助装置对落锤进一步加速,以达到更高的撞击速度和撞击能量。落锤与高速摄像机、动态力传感器等实验仪器相结合,还可以测量发射药在冲击载荷作用下的响应<sup>[16-17]</sup>。利用落锤冲击试验检测发射药的动态力学性能曾在我国某型坦克炮穿甲弹低温膛炸事故原因分析与问题解决过程中发挥过非常重要的作用<sup>[18]</sup>。宋时育等人<sup>[19]</sup>通过对硝胺发射药和低温感硝胺包覆发射药在低温下进行落锤冲击对比试验,得出硝胺发射药在低温下落锤冲击时的易破碎性使得低温感发射药在低温下点火之后火药燃面剧增,致使  $p-t$  曲线前移,  $p_m$  增高。马宏伟等人<sup>[20]</sup>采用落锤装置模拟装药在发射过程中的应力,用弹簧振子的模型来描述落锤试验的加载过程。重锤质量为  $m$ ,并视为刚体,把高度  $L$ 、截面积  $A$ 、弹性模量  $E$  的装药概括为一个刚度为  $k$  的弹簧,这样就形成一个弹簧振子。通过计算可得出最大应力和应力脉冲上升时间的表达式:

$$\sigma_m = v \sqrt{mE/(LA)}; \quad (1)$$

$$t = (\pi/2) \sqrt{mL/(EA)}; \quad (2)$$

$$d\sigma/dt = (E/L) \sqrt{2gH}。 \quad (3)$$

由式(1)和(2)可以看出,调节落锤的质量和速度、药床的截面积和高度等参数即可改变最大应力值,而脉冲宽度主要由落锤质量决定,与撞击速度无关,调节应力率主要靠调节落锤速度或药床尺寸。

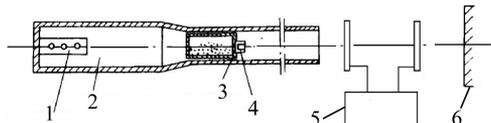
\* 收稿日期:2013-04-13

作者简介:陈言坤(1985~),男,博士研究生,主要从事弹药技术与保障研究。E-mail:cyk19860110@163.com

通信作者:罗兴柏(1962~),男,教授,主要从事弹药技术与保障研究。

## 1.2 空气炮试验

空气炮试验可用于研究发射药床在撞击和挤压作用下的破碎规律<sup>[21]</sup>。空气炮试验装置见图 1<sup>[22]</sup>。被试发射药装于运载器内,通过调整装药量和低压室容积可精确地在 0 ~ 200 m/s 范围内调整运载器速度,当运载器从空气炮中射出撞击到靶板时,制动器使运载器瞬时减速至静止状态,运载器内的发射药由于惯性力作用而发生撞击、挤压和破碎现象。在容器后部装上模拟假发射药,前部放一层真实发射药,可测得特定应力下发射药的破碎情况。



1 - 高压燃烧室; 2 - 低压室; 3 - 发射药运载器;  
4 - 制动器; 5 - 测速仪; 6 - 靶板

图 1 空气炮试验装置原理图

Fig. 1 Schematic diagram of air gun test apparatus

Cavaletti 等人<sup>[23]</sup>利用空气炮模拟火炮射击中发射药颗粒群撞击弹底时药粒的受力情况,并对获得的破碎发射药颗粒进行密闭爆发器试验,提出了用最大相对活度(撞击前后发射药活度的比值)来描述发射药的破碎程度。邹瑞荣等人<sup>[22]</sup>利用空气炮研究了撞击速度 68 ~ 80 m/s、温度在 -40℃ 条件下双芳-3 和 11/7 单基发射药的动态力学性能,通过在运载器中加入模拟假发射药研究了发射药颗粒在撞击和挤压两种不同受力状态下的破碎情况。翁春生等人<sup>[24]</sup>利用空气炮发射装置和动态压力传感器,测定了发射药颗粒间挤压应力与撞击速度之间的关系和不同环境温度下动态撞击与动态挤压的破碎程度,建立了发射药床破碎程度随挤压应力和温度变化的关系式。

## 1.3 分离式霍普金森 (Hopkinson) 压杆试验

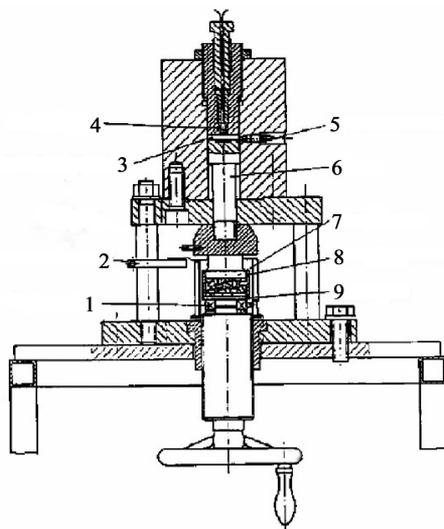
分离式霍普金森压杆是研究包括橡胶、高聚物、复合材料等黏弹性材料应变率在  $10^2 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$  范围内动态力学性能的一种有效方法<sup>[25-26]</sup>。其工作原理为:将试件夹在入射杆和透射杆之间,发射装置以一定的速度发射弹丸撞击入射杆,并在入射杆上产生压缩应力波,当该应力波传播到入射杆与试样界面处时,一部分应力波反射回入射杆,另一部分则传给试样并透过试样传入透射杆。利用粘贴在入射杆和透射杆上的应变片测得入射应力波  $\varepsilon_I(t)$ 、反射应力波  $\varepsilon_R(t)$  和透射应力波  $\varepsilon_T(t)$ ; 利用应力波理论求得被测试件应力  $\sigma_s$ 、应变  $\varepsilon_s$  和应变率  $\dot{\varepsilon}_s$  随时间的变化规律<sup>[27]</sup>:

$$\begin{cases} \sigma_s = E \left( \frac{A}{A_s} \right) \varepsilon_T; \\ \varepsilon_s = -\frac{2C_0}{l_s} \int_0^t \varepsilon_R d\tau; \\ \dot{\varepsilon}_s = -\frac{2C_0}{l_s} \varepsilon_R. \end{cases} \quad (4)$$

卢芳云等人<sup>[28]</sup>利用霍普金森压杆试验技术研究 PBX、B 炸药和复合固体推进剂 3 种含能材料的高应变率响应,分别得到了它们的应力—应变曲线。结果表明 3 种含能材料的应力、应变对应变率都比较敏感,表现出了不同的破坏规律。吴会民等<sup>[29]</sup>借助霍普金森压杆和扫描电镜研究了 PBX、B 炸药和复合固体推进剂 3 种含能材料在不同压缩应变率下的微观破坏特征,并分析了其破坏机理。霍普金森压杆试验已经成为研究材料动态力学性能的重要试验技术,对于含能材料弹性模量低的特点,在试验中需要采用入射波整形技术以保证应力平衡和常应变率加载。

## 1.4 动态挤压物理仿真试验

为模拟火炮发射过程中膛内发射药的受力环境,南京理工大学芮筱亭及其合作者设计了动态挤压物理仿真装置<sup>[15,30]</sup>,图 2 为该装置的原理图。



1 - 力传感器; 2 - 位移传感器; 3 - 燃烧室; 4 - 点火头;  
5 - 压力传感器; 6 - 活塞; 7 - 发射药; 8 - 试样药室; 9 - 底板

图 2 动态挤压物理仿真装置原理图<sup>[15]</sup>

Fig. 2 Schematic diagram of the device for dynamic compression simulation

该装置主要包括:燃烧室、传动活塞、装药室和底座。试验时,燃烧室内发射药燃烧生成的高压气体推动活塞,高速运动的活塞快速挤压装药室内的发射药,模拟发射过程中弹底发射药的受力状况。

陈涛等人<sup>[14,31-32]</sup>建立了用于动态挤压模拟装置

的半密闭爆发器控制方程组,调整半密闭爆发器的泄压孔直径、装药量以及火药颗粒直径等参数,可实现半密闭爆发器内不同压力变化规律。冯宾宾等人<sup>[33]</sup>利用发射药动态挤压仿真装置分别对低温、常温、高温发射药在发射过程中的破碎情况进行了模拟试验,用起始动态活度比定量描述了不同试验条件下发射药的破碎程度,建立了最大挤压应力与装药破碎程度之间的定量关系。通过动态挤压仿真装置,既保证了发射药动态挤压物理仿真的真实性,又有效保护了破碎后的药粒不被点燃,进而可建立膛内力学环境与发射药破碎程度之间的定量关系。

### 1.5 数值仿真研究

相对于发射药动态破碎的试验研究,数值仿真研究具有经济、方便和高效等特点,同时数值仿真也是对试验现象进行理论分析的重要手段。芮筱亭等人<sup>[34]</sup>用有限元软件分别对药粒在静载荷及冲击载荷作用下的力学行为进行了数值仿真,得出发射药颗粒在静载荷条件下发生体积断裂,而在冲击载荷条件下则发生接触断裂;并建立了不同承载方式下破碎程度与载荷幅度间的关系式。洪俊等人<sup>[35-36]</sup>以三维球单元离散单元法为基础,采用 Mohr-Coulomb型破坏准则,建立了发射药粒的破碎模型,仿真了发射药粒以不同初速冲击刚性界面的破碎过程。姜世平等人<sup>[37]</sup>以离散元法为基础,模拟发射药粒的自然堆积过程,并获得了发射药床的密实堆积构型;将发射药床离散成弹簧-球单元系统,采用 Mohr-Coulomb 型破坏准则,数值仿真了发射药粒的冲击破碎动力学过程,仿真结果与试验结果吻合较好。

## 2 发射药破碎描述方法

发射药破碎描述方法是发射药发射安全性研究的基础理论之一。目前主要的描述方法有破碎度法、动态活度比法和燃烧渐增因子法等。

### 2.1 破碎度法

为定量描述发射药的破碎程度,金志明等人<sup>[9]</sup>提出了发射药破碎度的概念,即破碎后发射药的初始燃面与其破碎前初始燃面之比。其表达式为:

$$B_r = \frac{S_{br}}{S_{st}} = \sum_{i=1}^n \frac{\varepsilon_i S_i}{S_0} \quad (5)$$

式中: $B_r$ 为发射药破碎度; $S_{st}$ 为破碎前初始燃面; $S_{br}$ 为破碎后初始燃面; $\varepsilon_i$ 为占总质量的百分数; $S_i$ 为第*i*破碎等级单颗药粒的表面积; $S_0$ 为破碎前单颗药粒的表面积。

用破碎度描述发射药破碎程度,必须采用标准筛把破碎发射药筛滤成若干个等级,然后计算出每

等级发射药粒的平均质量,对于破碎不规则的药粒近似认为是球形并计算其表面积。显然这种方法操作不便,且计算出的初始燃面存在很大误差,另外,发射药的破碎表现为两种形态,一种是碎块或粉末,另一种是表面裂纹、内部裂纹,而这种方法是无法描述粉末和裂纹对破碎发射药燃面增加的贡献的。

### 2.2 初始动态活度比法

陈涛等人<sup>[38]</sup>认为发射药的破碎程度与初始燃面大小密切相关,但由于破碎后的发射药形状各异,难以直接测量计算破碎发射药的初始燃面。为描述发射药破碎前后初始燃面的变化,笔者引进了初始动态活度比的概念,即破碎后发射药动态活度与破碎前的比值。发射药的动态活度*L*表达式为:

$$L = \frac{dp}{dt} / (pp_m) \quad (6)$$

式中: $p$ 为密闭爆发器试验中某时刻压力; $p_m$ 为最大压力。

根据定容条件下火药气体状态方程、几何燃烧定律、正比燃速条件,破碎后发射药的动态活度比可表示为:

$$\frac{L}{L_0} = \frac{\beta^2 \rho u S}{\beta_m^2 \rho_0 u_0 S_0} \approx \frac{S}{S_0} \quad (7)$$

式中:带下标“0”的符号为破碎前发射药的参数; $L$ 为破碎发射药动态活度; $L_0$ 为破碎前发射药动态活度; $u$ 为发射药燃速系数; $S$ 为正在燃烧发射药的表面积; $\beta$ 是压力*p*的一个函数, $\beta_m$ 表示最大压力条件下备用的 $\beta$ 值<sup>[38]</sup>。

由式(7)可知,动态活度比近似于燃烧面积比,即可用发射药的动态活度比描述破碎发射药燃烧表面积变化情况。资料<sup>[38]</sup>提出对横坐标在0.2~0.7区间的动态活度比曲线进行线性拟合,把拟合直线在纵坐标上的截距定义为初始动态活度比,并用该值来定量描述发射药的破碎程度。

### 2.3 燃烧渐增因子法

王琼林等人<sup>[39]</sup>提出了一种基于密闭爆发器试验的发射药燃烧渐增性定量评价方法,即燃烧渐增因子法。由密闭爆发器试验得到的*p-t*曲线经数据处理得到*L-B*曲线,其中*L*为动态活度,*B*为相对压力,定义如下:

$$B = p/p_m \quad (8)$$

*L-B*曲线可表征发射药动态活度的分布。为定量描述不同发射药动态活度分布的差异,资料<sup>[39]</sup>引进了燃烧渐增因子*P<sub>r</sub>*,其表达式为:

$$P_r = B_s \times L_s / (L_{0.1} + L_{0.3}) \quad (9)$$

式中:  $B_s$  和  $L_s$  分别为燃烧分裂点处的相对压力和动态活度;  $L_{0.1}$  为相对压力为 0.1 对应的动态活度值;  $L_{0.3}$  为相对压力为 0.3 对应的动态活度值。

$P_r$  的物理意义为: 其值大小反映了发射药燃烧渐增性的大小,  $P_r$  值越大, 燃烧渐增性越强。不同破碎程度的发射药其能量释放规律发生变化, 同样其动态活度分布也会发生变化, 因此可用燃烧渐增因子  $P_r$  来定量描述发射药的破碎情况。

另外, 邹瑞荣等人<sup>[22]</sup>认为破碎成小块和粉末的发射药会显著增加其表面积和初始燃烧速度, 进而有可能引发异常压力, 因此提出用小块碎药和粉末的质量分数来表示发射药的破碎程度。

### 3 展望

火炮发射过程中膛内的力学环境极为复杂且过程短暂, 直接研究发射过程中膛内发射药的受力和破碎情况是相当困难的, 通常采用膛外模拟的方法进行试验研究。由于目前所采用的模拟试验与实际射击时的膛内环境不完全相同, 要把模拟试验得到的数据运用到发射药的发射安全性评估中还有相当的工作要做:

1) 发展新的测试技术和方法, 检测发射药在膛内的运动过程和撞击弹底的速度, 分析其受力特点, 尤其是撞击弹底时的受力特点;

2) 探索新的膛外物理仿真试验方法, 研究发射药在冲击载荷条件下的破碎情况;

3) 进一步研究数值仿真实论和方法, 分析结合试验现象, 争取找到宏观力学响应与微观机制相关联的桥梁, 建立合理的本构模型和破碎模型, 为描述发射药粒受到冲击载荷时的力学响应以及破碎规律提供理论基础;

4) 发射药床是由发射药粒组成的散粒体系统, 在冲击载荷作用下, 药床中不同位置发射药粒的受力特点和破碎情况还需要进一步研究。

### 参 考 文 献

- [1] 芮筱亭, 负来峰, 王国平, 等. 弹药发射安全性导论 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 11-12.  
Rui Xiaoting, Yun Laifeng, Wang Guoping, et al. Direction to launch safety of ammunition [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009: 11-12.
- [2] 芮筱亭, 负来峰, 沙南生, 等. 发射装药发射安全性评定技术的研究进展 [J]. 兵工学报, 2005, 26(5): 690-696.  
Rui Xiaoting, Yun Laifeng, Sha Nansheng, et al. Advance on launch safety for gun propellant charge [J]. Acta Armamentarii, 2005, 26(5): 690-696.

- [3] Gusachenko L K, Zarko V E. Analysis of unsteady solid-propellant combustion models [J]. Combustion, Explosion and Shock Waves, 2008, 44(1): 31-42.
- [4] Keller G E, Horst A W. Effects of propellant grain fracture on the interior ballistics of guns [R]. AD-A209 007/4/GAR, 1989: 1-5.
- [5] Musanic S M, Suceška M. Artificial ageing of double base rocket propellant effect on dynamic mechanical properties [J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2009, 96(2): 523-529.
- [6] 负来峰, 芮筱亭, 王浩, 等. 对发射装药引起膛炸机理的讨论 [J]. 兵工学报, 2007, 28(2): 153-157.  
Yun Laifeng, Rui Xiaoting, Wang Hao, et al. Discussion about mechanism of breech-blow caused by gun propellant charge [J]. Acta Armamentarii, 2007, 28(2): 153-157.
- [7] 金志明, 翁春生, 张国强. 膛炸模式及其机理分析 [J]. 兵工学报, 2001, 22(4): 448-451.  
Jin Zhiming, Weng Chunsheng, Zhang Guoqiang. Types of breech blows and analyses on their mechanisms [J]. Acta Armamentarii, 2001, 22(4): 448-451.
- [8] 杨均匀, 袁亚雄, 张小兵. 发射药破碎对火炮射击安全性影响的研究综述 [J]. 弹道学报, 1999, 11(4): 92-96.  
Yang Junyun, Yuan Yaxiong, Zhang Xiaobing. Research survey of the effect of grain fracture on the fire safety in solid propellant gun [J]. Journal of Ballistics, 1999, 11(4): 92-96.
- [9] 金志明, 翁春生. 火炮装药设计安全学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2001: 46-99.  
Jin Zhiming, Weng Chunsheng. Charge design safety of guns [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001: 46-99.
- [10] Gazonas G A. A uniaxial nonlinear thermoviscoelastic constitutive model with damage for M30 gun propellant [R]. AD-A283 626, 1994.
- [11] 胡国胜, 曾昭煌, 罗运军, 等. 发射药冲击断裂时的形态结构及其断裂破坏机理 [J]. 兵工学报, 1993, 14(1): 42-46.  
Hu Guosheng, Zeng Zhaohuang, Luo Yunjun, et al. Morphological structures and fracture mechanisms of gun propellants during impact fracture [J]. Acta Armamentarii, 1993, 14(1): 42-46.
- [12] 邱沛蓉, 董健年. 装药射击安全性模拟检测方法研究 [J]. 弹道学报, 1995, 7(1): 17-23.  
Qiu Peirong, Dong Jiannian. Investigation on laboratory simulation of firing safety of propellant charge [J]. Journal of Ballistics, 1995, 7(1): 17-23.
- [13] 周彦煌, 张明安, 刘千里. 炮用发射药动态破碎试验方法及破碎现象的观察 [J]. 弹道学报, 1990, 2

- (1): 59-67, 12.
- Zhou Yanhuang, Zhang Ming'an, Liu Qianli. An experiment method and phenomenon observation of dynamic fragmenting for gun propellants [J]. Journal of Ballistics, 1990, 2(1): 59-67, 12.
- [14] 陈涛, 芮筱亭, 凌剑, 等. 发射药床动态挤压破碎模拟研究[J]. 南京理工大学学报: 自然科学版, 2006, 30(4): 467-471.
- Chen Tao, Rui Xiaoting, Ling Jian, et al. Dynamic extrusion and fracture simulation of propellant charge bed [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology: Nature Science, 2006, 30(4): 467-471.
- [15] 芮筱亭, 冯宾宾, 王国平. 发射装药发射安全性评估方法[J]. 兵工自动化, 2011, 30(5): 56-59, 71.
- Rui Xiaoting, Feng Binbin, Wang Guoping. Evaluation method of launch safety of propellant charge [J]. Ordnance Industry Automation, 2011, 30(5): 56-59, 71.
- [16] 王世英, 胡焕性. B 炸药装药发射安全性落锤模拟加载实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(3): 275-278.
- Wang Shiyong, Hu Huanxing. Drop hammer simulation study on launch safety of composite B [J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(3): 275-278.
- [17] Chen Pengwan, Dai Kaida, Huang Fenglei, et al. Ultrasonic evaluation of the impact damage of polymer bonded explosives [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2004, 13(3): 242-246.
- [18] 贺孝军, 徐霞, 杜兰平, 等. 热塑性弹性体对硝胺发射药力学性能和燃烧性能的影响[J]. 含能材料, 2011, 19(1): 65-68.
- He Xiaojun, Xu Xia, Du Lanping, et al. Effect of thermoplastic elastomer on mechanical properties and combustion performance of nitroamine propellant [J]. Chinese Journal of Energetic Material, 2011, 19(1): 65-68.
- [19] 宋时育, 王泽山. 低温感硝胺发射药混合装药的应用研究[J]. 弹道学报, 2000, 12(1): 11-14.
- Song Shiyu, Wang Zeshan. The application research on the low temperature sensitivity charge of nitramine propellant [J]. Journal of Ballistics, 2000, 12(1): 11-14.
- [20] 马宏伟, 姚保学. 炸药装药发射安全性模拟试验方法研究[J]. 弹道学报, 2004, 16(4): 57-61.
- Ma Hongwei, Yao Baoxue. Experimental simulation methods for launching security of explosive charge [J]. Journal of Ballistics, 2004, 16(4): 57-61.
- [21] 张小兵, 翁春生, 袁亚雄, 等. 火药低温挤压破碎及其异常燃烧数值预测[J]. 南京理工大学学报: 自然科学版, 1998, 22(2): 165-168.
- Zhang Xiaobing, Weng Chunsheng, Yuan Yaxiong, et al. Propellant's breakup at low temperature and prediction of its abnormal burning [J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology: Nature Science, 1998, 22(2): 165-168.
- [22] 邹瑞荣, 袁亚雄, 翁春生, 等. 膛内火药床撞击与挤压的动态模拟实验[J]. 弹道学报, 1998, 10(3): 66-69, 84.
- Zou Ruirong, Yuan Yaxiong, Weng Chunsheng, et al. Dynamic similarity experiments of propellants impact and compression in the bore [J]. Journal of Ballistics, 1998, 10(3): 66-69, 84.
- [23] Cavaletti M, Moles D. Mechanical simulation of a gun shot in interior ballistics [C]//11th International Symposium on Ballistics Brussels, 1989: 532-548.
- [24] 翁春生, 金志明, 邹瑞荣. 含能颗粒床颗粒间应力对动态破碎的影响[J]. 燃烧科学与技术, 2005, 11(1): 6-9.
- Weng Chunsheng, Jin Zhiming, Zou Ruirong. Influence of the inter-granular stress in energetic particle bed on dynamic grain fracture [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2005, 11(1): 6-9.
- [25] 余同希, 邱信明. 冲击动力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011: 47-54.
- Yu Tongxi, Qiu Xinming. Impact dynamics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2011: 47-54.
- [26] 邓琼, 叶婷, 苗应刚. 基于 Hopkinson 压杆实验技术研究火工品及含能材料的抗过载能力[J]. 火炸药学报, 2009, 32(6): 66-70.
- Deng Qiong, Ye Ting, Miao Yinggang. Study on overloading-resistibility of initiator and energetic materials based on the technique of Hopkinson pressure bar [J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2009, 32(6): 66-70.
- [27] 索涛, 邓琼, 苗应刚, 等. 基于 Hopkinson 压杆实验技术的含能材料动态力学性能测试方法研究进展[J]. 火炸药学报, 2010, 33(2): 5-9.
- Suo Tao, Deng Qiong, Miao Yinggang, et al. Progress in experimental determination of dynamic mechanical behaviors of energetic materials based on split Hopkinson pressure bar [J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2010, 33(2): 5-9.
- [28] 卢芳云, 林玉亮, 王晓燕, 等. 含能材料的高应变率响应实验[J]. 火炸药学报, 2006, 29(1): 1-4.
- Lu Fangyun, Lin Yuliang, Wang Xiaoyan, et al. Experimental investigation on dynamic response of energetic materials at high strain in rate [J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2006, 29(1): 1-4.
- [29] 吴会民, 卢芳云, 卢力, 等. 压缩加载下三种含能材料细观破坏特征观察[J]. 高压物理学报, 2005, 19

- (3):213-218.
- Wu Huimin, Lu Fangyun, Lu Li, et al. Microstructure fractural characteristics of energetic materials under compressive loading [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2005, 19(3):213-218.
- [30] 凌剑, 芮筱亭, 负来峰, 等. 膛内燃烧与力学环境物理仿真技术研究[J]. 南京理工大学学报:自然科学版, 2006, 30(4): 512-516.
- Ling Jian, Rui Xiaoting, Yun Laifeng, et al. Simulation of status of combustion and mechanics of propellant charge in chamber[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology: Nature Science, 2006, 30(4): 512-516.
- [31] 陈涛, 芮筱亭, 洪俊, 等. 用于药床动态挤压应力研究的半密闭爆发器仿真[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(17): 4075-4078.
- Chen Tao, Rui Xiaoting, Hong Jun, et al. Semi-closed bomb simulation using study dynamic extrusion stress of charge bed[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(17): 4075-4078.
- [32] 陈涛. 火炮发射装药发射安全性数值仿真与试验研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
- Chen Tao. Numerical simulation and experiment study on launch safety of gun propellant charge [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007.
- [33] 冯宾宾, 芮筱亭, 徐浩, 等. 发射过程中某硝酸铵发射装药的动态挤压破碎情况[J]. 火炸药学报, 2012, 35(2): 70-73, 85.
- Feng Binbin, Rui Xiaoting, Xu Hao, et al. Dynamic compression fracture condition of one nitroamine propellant charge during launch course[J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2012, 35(2): 70-73, 85.
- [34] 芮筱亭, 刘军, 陈涛, 等. 发射药挤压破碎动力学分析[J]. 兵工学报, 2004, 25(6): 679-683.
- Rui Xiaoting, Liu Jun, Chen Tao, et al. Dynamic analysis on the extrusion and rupture of propellants[J]. Acta Armamentarii, 2004, 25(6): 679-683.
- [35] 洪俊, 芮筱亭. 发射药粒冲击破碎动力学仿真[J]. 弹道学报, 2010, 22(1): 61-64.
- Hong Jun, Rui Xiaoting. Dynamic simulation for impact and fracture of propellant grain[J]. Journal of Ballistics, 2010, 22(1): 61-64.
- [36] 洪俊, 芮筱亭, 费庆国. 发射药床挤压破碎动力学仿真[J]. 系统仿真学报, 2010, 22(4): 1018-1021.
- Hong Jun, Rui Xiaoting, Fei Qingguo. Dynamic simulation for propellant bed with press and fracture[J]. Journal of System Simulation, 2010, 22(4): 1018-1021.
- [37] 姜世平, 芮筱亭, 洪俊, 等. 发射药床冲击破碎过程的数值模拟[J]. 固体力学学报, 2011, 32(4): 419-425.
- Jiang Shiping, Rui Xiaoting, Hong Jun, et al. Simulation of fragmentation process of propellant bed under impact load [J]. Chinese Journal of Solid mechanic, 2011, 32(4): 419-425.
- [38] 陈涛, 芮筱亭, 负来峰. 发射药破碎程度描述方法[J]. 弹道学报, 2008, 20(2): 99-102.
- Chen Tao, Rui Xiaoting, Yun Laifeng. Method of describing fracture degree of propellant[J]. Journal of Ballistics, 2008, 20(2): 99-102.
- [39] 王琼林, 赵小锋, 刘少武, 等. 一种基于密闭爆发器试验的发射药燃烧渐增性定量评价方法[J]. 火炸药学报, 2009, 32(3): 71-74.
- Wang Qionglin, Zhao Xiaofeng, Liu Shaowu, et al. A quantitative assessment method of gun propellant combustion progressivity based on closed bomb test [J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2009, 32(3): 71-74.

### Research Progress of Dynamic Fracture of Granular Propellant

CHEN Yankun<sup>①</sup>, ZHEN Jianwei<sup>①</sup>, WU Hui'en<sup>②</sup>, ZHANG Yanming<sup>①</sup>, LUO Xingbai<sup>①</sup>

<sup>①</sup>Department of Ammunition Engineering, Ordnance Engineering College (Hebei Shijiazhuang, 050003)

<sup>②</sup>Military Representatives Office in Xining of Military Representative Bureau of Chemical Defense (Qinghai Ledu, 810700)

[ABSTRACT] Drop hammer test, air gun test, split Hopkinson pressure bar test and dynamic compression simulating test are reviewed for their applications in the dynamic fracture study of granular propellant. The characterization methods to describe the fracture extent of propellant such as grains fracture degree, initial dynamic vivacity ratio and combustion increasing factor are introduced as well. It is suggested that further researches in the force of propellant grains in different parts of propellant bed under impact load, constitutive model and cracking model are still needed to provide the theoretical bases for describing the propellant fracture rules in the launch process.

[KEY WORDS] energetic materials; granular propellant; dynamic fracture; launch security; overview