

文章编号: 1006-9941(2015)01-0057-05

## 发射装药破碎程度表征方法研究

王 燕<sup>1</sup>, 芮筱亭<sup>1</sup>, 冯宾宾<sup>1</sup>, 陈 涛<sup>2</sup>, 王国平<sup>1</sup>

(1. 南京理工大学发射动力学研究所, 江苏 南京 210094; 2. 南京理工大学力学实验中心, 江苏 南京 210094)

**摘 要:** 为定量表征发射装药的破碎程度, 引入了动态活度比和起始动态活度比的概念。采用密闭爆发器内燃气状态方程, 推导出: 动态活度比即为破碎发射装药与相应未破碎发射装药的燃烧表面积比, 起始动态活度比即为破碎发射装药与相应未破碎发射装药初始时刻的燃烧表面积之比。用三种均为花边 19 孔仅长度不同(13.6, 10, 5 mm)的发射药进行了密闭爆发器试验。获得了不同长度发射药的  $p-t$  曲线。处理  $p-t$  曲线得到相应发射装药的起始动态活度比。根据几何形状通过计算获得不同长度的发射药的初始表面积, 从而获得发射装药的起始动态活度比。结果表明, 起始动态活度比的试验结果接近理论计算值, 误差仅为 1.8852%, 说明发射装药起始动态活度比可以定量表征破碎发射装药的破碎程度。

**关键词:** 兵器科学与技术; 发射装药; 破碎程度; 动态活度比; 起始动态活度比

**中图分类号:** TJ55

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.01.012

### 1 引 言

经过多年研究, 业内已对发射装药引起膛炸的机理形成了“挤压-碎破-增面-增燃-增压”的共识。一定装药结构下发射装药引起膛炸的主要原因是, 弹底发射装药被点燃前受到发射装药颗粒间的挤压应力作用产生了破碎, 使发射装药燃面急增, 引起燃气生成速率猛增, 导致弹道起始段膛压猛增, 产生膛炸<sup>[1-7]</sup>。因此, 定量表征相应装药结构下的弹底发射装药被点燃前的破碎程度是建立发射装药发射安全性评估判据的关键。

破碎后的发射药没有统一的形状, 颗粒大小不一, 含有表面裂纹, 难以通过纯几何理论方法计算破碎装药的表面积。文献[8]曾提出用发射药破碎度的概念来描述发射药的破碎程度, 并用数值计算和试验方法研究了破碎度与内弹道性能乃至膛内异常压力之间的关系; 文献[9]提出采用分维数来表征发射药的破碎程度; 文献[10]提出利用起始动态活度比表征发射装药的破碎程度。文献[8]和[9]提出的方法均不能

定量表征发射装药的破碎程度, 文献[10]只是提出了一种建议, 并没有进一步论证。

为此, 本研究通过理论推导与数值仿真, 论证了用发射装药起始动态活度比表征发射装药破碎程度的科学性, 并利用密闭爆发器对组分相同、均为花边 19 孔仅长度不同(13.6, 10, 5 mm)的发射装药进行测试, 验证起始动态活度比表征破碎程度的合理性。

### 2 发射装药动态活度比与燃烧表面积比的关系

发射装药在密闭爆发器内燃气状态方程<sup>[7]</sup>为:

$$\rho \left[ V_0 - \frac{\omega}{\rho} - \left( \alpha - \frac{1}{\rho} \right) \omega \psi \right] = f \omega \psi \quad (1)$$

式中,  $p$  为燃气压力, Pa;  $V_0$  为密闭爆发器的容积,  $m^3$ ;  $\omega$  为发射药质量, kg;  $\rho$  为发射药密度,  $kg \cdot m^{-3}$ ;  $\alpha$  为燃气余容,  $m^3 \cdot kg^{-1}$ ;  $f$  为发射药火药力,  $J \cdot kg^{-1}$ ;  $\psi$  为发射药已燃比例。

令

$$\beta = 1 + \left( \alpha - \frac{1}{\rho} \right) \frac{p}{f} \quad (2)$$

把式(2)代入式(1), 有:

$$\rho \left( V_0 - \frac{\omega}{\rho} \right) = f \omega \psi \beta \quad (3)$$

当  $\psi = 1$  时,  $p = p_m, \beta = \beta_m$ , 有:

$$\rho_m \left( V_0 - \frac{\omega}{\rho} \right) = f \omega \beta_m \quad (4)$$

收稿日期: 2013-09-02; 修回日期: 2014-04-28

基金项目: 高校博士点基金(20113219110025), 国家自然科学基金资助(11102089), 新世纪优秀人才支持计划资助(NCET-10-0075)

作者简介: 王燕(1986-), 女, 博士研究生, 主要从事发射装药发射安全性研究。e-mail: wangyanqianhuang@163.com

通信联系人: 芮筱亭(1956-), 男, 教授, 主要从事发射装药发射安全性研究。e-mail: ruixt@163.net

式中,  $p_m$  为燃气最大压力, Pa。

式(3)除以式(4), 有:

$$\psi = \frac{\beta_m p}{\rho_m \beta} \quad (5)$$

式(5)两边对时间  $t$  求导, 则:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{\rho_m \beta^2}{\beta_m} \frac{d\psi}{dt} \quad (6)$$

由内弹道学<sup>[11]</sup>可知:

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{S_1 e_1}{\Lambda_1} \sigma \frac{dZ}{dt} \quad (7)$$

式(7)中,  $\Lambda_1 = \omega/\rho$ ,  $\sigma = S/S_1$ ,  $dZ/dt = u_1 p^n/e_1$ , 则式(7)可写为:

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{\rho S u_1 p^n}{\omega} \quad (8)$$

则根据动态活度  $L$  定义<sup>[7]</sup>:

$$L = \frac{dp/dt}{\rho p_m} = \frac{\beta^2 \rho u_1}{\beta_m \omega} p^{n-1} S \quad (9)$$

式中,  $S_1$  为发射药初始面积,  $m^2$ ;  $2e_1$  为发射药弧厚,  $m$ ;  $\Lambda_1$  为发射药初始体积,  $m^3$ ;  $\sigma$  为相对燃烧面积,  $S$  为正在燃烧的发射药表面积  $m^2$ ;  $Z$  为相对燃烧厚度,  $u_1$  为发射药的燃速系数,  $m \cdot s^{-1} \cdot Pa^{-n}$ ;  $n$  为发射药的燃速指数。

根据发射药动态活度比  $R$  定义<sup>[1]</sup>:

$$R = \frac{L'}{L_0} = \frac{\frac{1}{p' p_m} \frac{dp'}{dt}}{\frac{1}{p_0 p_m} \frac{dp_0}{dt}} \bigg|_{p'/p_m = p_0/p_m} \quad (10)$$

式中,  $L$  为发射药动态活度, 上标“'”表示破碎发射装药, 下标“0”表示未破碎发射装药。

在相同质量、相同组分的发射装药条件下, 发射药的  $u_1$ 、 $\omega$ 、 $\rho$  相同, 密闭爆发器内最大压力  $p_m$  相等。在对应相同  $\frac{p}{p_m}$  值的瞬时压力  $p_0$  与  $p'$  相等, 由式(2)可知此时  $\beta_0$  与  $\beta'$  也相等, 把式(9)带入式(10)可得:

$$R = \frac{\frac{\beta'^2 \rho u_1}{\beta'_m \omega} p'^{n-1} S'}{\frac{\beta_0^2 \rho u_1}{\beta_{0m} \omega} p_0^{n-1} S_0} \bigg|_{p'/p_m = p_0/p_m} = \frac{S'}{S_0} \quad (11)$$

由式(11)可知, 发射装药动态活度比就是破碎发射装药与相应未破碎发射装药的燃烧表面积比。

### 3 发射装药起始动态活度比的处理方法

在药床内所有发射药同时被点燃的理想点火状态

下, 动态活度比的起始值能够反映弹底发射药床的起始燃烧表面积比, 也就是发射药床的破碎程度。由于密闭爆发器内药床实际点火阶段燃烧状况极为复杂, 受点火过程的影响很大, 导致动态活度比曲线的起始阶段振荡剧烈, 测试值和真实值相差很大, 难以直接用于描述发射装药的初始燃烧表面积比, 只有通过密闭爆发器试验所获得的压力曲线进行一定的处理后, 才能获得破碎发射装药的起始动态活度比。

根据式(9)可得  $L_0-p_0$ 、 $L'-p'$  曲线, 进而获得  $L_0-p_0/p_m$ 、 $L'-p'/p_m$  曲线, 由式(10)可得到  $R-p/p_m$  曲线, 如图1所示。由图1可见,  $0.2 < p/p_m < 0.8$  时, 动态活度比曲线比较平缓且近似线性;  $p/p_m < 0.2$  时, 受点火过程的影响, 发射装药动态活度比曲线剧烈抖动且迅速衰减;  $p/p_m > 0.8$  时, 发射药出现分裂, 所以这部分被排除在计算发射装药动态活度比的区域之外。因此, 在动态活度比曲线上以步长 0.1 取区间  $[0.2, 0.8]$  上的多个数据点, 用最小二乘法拟合一条直线, 该直线与纵坐标轴的截距为破碎发射装药相对于未破碎发射装药的起始动态活度比  $R_0$ , 如图1所示。因此,  $R_0$  就是破碎发射装药与相应未破碎发射装药的初始燃烧表面积比。

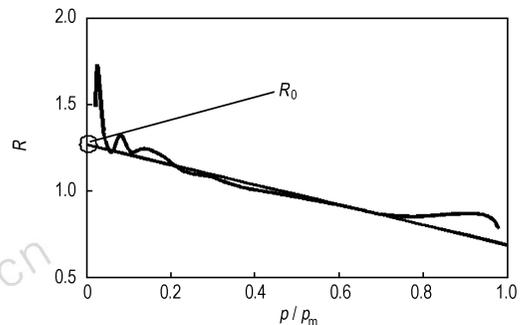


图1 典型发射装药的动态活度比曲线和起始动态活度比  
Fig. 1 Representative dynamic vivacity ratio curve and initial dynamic vivacity ratio (IDVR) of typical propellant charge

### 4 发射装药起始动态活度比仿真分析

为了验证式(11)的准确性, 采用密闭爆发器内的燃烧动力学方程<sup>[11]</sup>, 对具有相同组分、形状均匀的发射药燃烧过程进行仿真。由于管状、球状、方棍状的发射药形状简单, 通过几何形状计算其表面积较方便, 仿真时选择管状、球状、方棍状的发射药为研究对象。假设有质量相同、组分相同、形状均匀的管状、球状、方棍状三种发射药, 在密闭爆发器内同时点燃, 发射药燃烧

服从几何燃烧定律<sup>[11]</sup>,燃气服从 Nobel-Abel 气体状态方程<sup>[11]</sup>,燃气组分在燃烧过程中保持不变。

通过对管状、球状、方棍三种发射药在密闭爆发器内燃烧过程的仿真,获得三种发射药的  $p-t$  曲线,如图 2 所示。需选取一种初始表面积最小、燃烧最慢的发射装药作为参照,而方棍状发射装药符合作为参照的要求,根据第 3 节的处理方法得到其他两种发射装药相对于方棍状发射装药的动态活度比曲线以及通过几何形状和几何燃烧定律计算得到的燃烧表面积比与动态活度比的变化过程相同,说明:对于相同质量、相同组分的发射装药,发射装药动态活度比可以准确表征破碎发射装药与相应未破碎发射装药的燃烧表面积比,验证了式(11)的准确性。

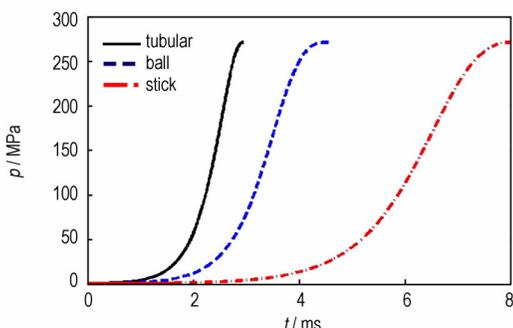


图 2 三种发射药密闭爆发器内压力仿真曲线  
Fig.2 Pressure curves in closed bomb of three kinds of propellants obtained by simulation

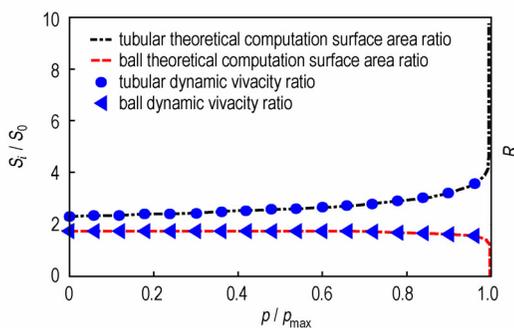


图 3 几何形状计算获得的表面积比曲线与动态活度比曲线  
Fig.3 The theoretical surface ratio curves obtained by geometry and dynamic vivacity ratio curves

## 5 发射装药起始动态活度比试验

### 5.1 试验系统

发射装药起始动态活度比试验系统由密闭爆发器、测压传感器、信号放大器、数据采集系统、点火电源以及数值处理系统等组成,如图 4 所示。试验时,装填

密度为  $0.2 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,试验初温为  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 。将发射药放入密闭爆发器中,点火药燃烧引燃发射药,发射药燃烧生成的气体压力由传感器实时测量。

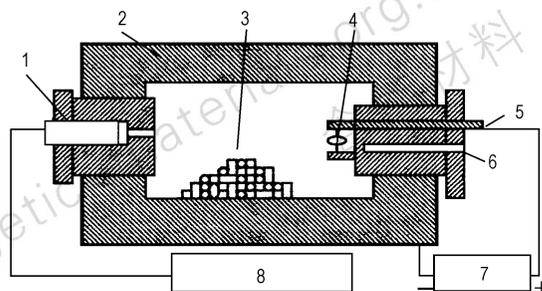


图 4 发射装药起始动态活度比试验系统  
1—测压孔, 2—密闭爆发器, 3—发射药, 4—点火药, 5—电极, 6—排气孔, 7—点火电源, 8—数据采集系统  
Fig.4 Testing system for IDVR of propellant charge  
1—pressure measurement hole, 2—closed bomb, 3—propellants, 4—igniting charge, 5—electrode, 6—escape hole, 7—ignition battery, 8—data acquisition system

### 5.2 试验用药

现实中没有与上述仿真完全一样的发射药,而目前应用比较广泛的是某种新型的硝胺发射药。所以,试验所用的发射药为某新型硝胺发射药,发射药为花边 19 孔,弧厚为  $1.69 \text{ mm}$ ,外径为  $12.39 \text{ mm}$ ,内孔径为  $0.45 \text{ mm}$ ,长度为  $13.6 \text{ mm}$ 。为了通过试验验证起始动态活度比就是初始面积之比,用铣床将发射药长度分别铣为  $10 \text{ mm}$  和  $5 \text{ mm}$ 。三种发射药的参数如表 1 所示。以长度为  $13.6 \text{ mm}$  的发射药为参照,其余两种视为破碎发射药。

表 1 花边 19 孔发射药的参数  
Table 1 Parameters of petal propellants with 19 holes

No.	2c/mm	mass/g
0	13.60	140.40
1	10.00	140.50
2	5.00	140.50

Note: 2c is the length of propellant.

### 5.3 试验结果与分析

三种发射药在密闭爆发器内的  $p-t$  曲线如图 5 所示。由图 5 可见,三种发射装药最大压力基本一致,是由于三种发射药的装药质量相同,且火药力一样;“1”和“2”发射装药燃烧时比“0”发射装药早到达最大压力值,因为“1”和“2”发射装药颗粒较小,初始燃面较大,燃烧速度较快,较早燃完即较早达到最大压力,即

破碎发射装药的燃尽时间明显比未破碎发射装药的短,这一现象与“破碎-增面-增燃”的概念是一致的。

为了获得“1”和“2”发射装药的破碎程度,根据发射装药起始动态活度比的处理方法,由  $p-t$  曲线处理得到的动态活度曲线(图6),由动态活度曲线处理得到的动态活度比曲线及起始动态活度比,如图7所示。由图7可知,“1”发射装药的起始动态活度比为1.0316,“2”发射装药的起始动态活度比为1.1998,说明“2”发射装药的破碎程度大于“1”,这与图5中2发破碎发射装药的燃烧时间逐步缩短相吻合。表2为根据几何形状计算的破碎发射装药与未破碎发射装药的起始动态活度比,误差仅为1.8852%,表明发射装药起始动态活度比在实际试验过程中也能准确地表征发射药的破碎程度。

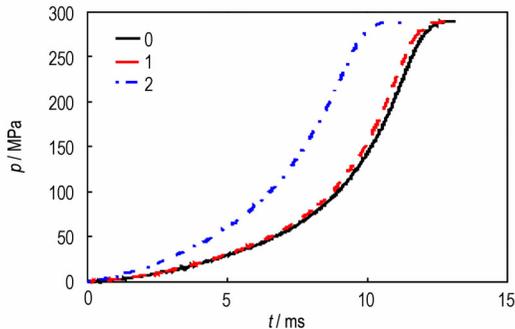


图5 三种发射药的压力曲线

Fig.5 Pressure curves of three kinds of propellants

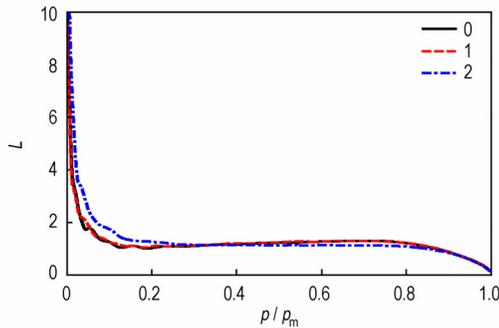


图6 三种发射药的动态活度曲线

Fig.6 Dynamic vivacity curves of three kinds of propellants

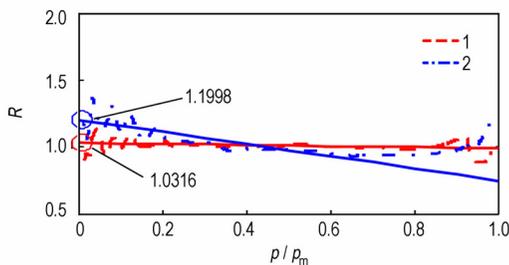


图7 不同破碎程度发射药的动态活度比曲线及起始动态活度比

Fig.7 Dynamic vivacity ratio curves and IDVRs of propellants with different fragmentation degree

表2 根据几何形状计算的起始动态活度比与试验结果对比

Table 2 Comparison of the IDVRs obtained by geometrical shape with experimental results

No.	initial dynamic vivacity ratio $R_0$		error/%
	calcd.	exp.	
1	1.0378	1.0316	-0.5974
2	1.1776	1.1998	1.8852

## 6 结论

(1) 理论推导了发射装药动态活度比就是破碎发射装药与相应未破碎发射装药的燃烧表面积比,且通过数值仿真得到了验证。

(2) 对三种均为花边19孔,弧厚为1.69 mm,外径为12.39 mm,内孔径为0.45 mm,长度分别为13.6 mm、10 mm和5 mm的发射药进行了密闭爆发器试验,起始动态活度比的试验结果与理论计算结果误差仅为1.8852%。说明发射装药起始动态活度比能定量表征发射药的破碎程度。

弹底发射装药破碎程度是评判发射装药发射安全性的关键数据。本文提出了用起始动态活度比表征破碎发射装药的破碎程度的方法,为发射装药发射安全性评估提供了一条技术途径。

### 参考文献:

- [1] Eijkman P F W. Problems with fracture of the propellant grains [R]. PB91-167122/HDM, 1988.
- [2] Lieb R J, Trevino S F, Barnes J D. Onset and nature of fracture of uniaxially compressed gun propellant. A small angle neutron and X-ray scattering study [R], AD-A268 882/8, 1993.
- [3] Lieb R J, Leadore M G. Correlation of the failure modules to fracture-generated surface area in uniaxially compressed M30 gun propellant [R], AD-A273 681/7/GAR, 1993.
- [4] Lieb R J. Correlation of the failure modules to fracture-generated surface area in uniaxially compressed M43 gun propellant [R], AD-A302 379/3/HDM, 1995.
- [5] Lieb R J. Mechanical response and morphological characterization of gun propellant [R], ARL-TR-1205, 1996.
- [6] Clifford W F, Bertram K M. Ballistic criteria for propellant grain fracture in the GALL-8/A30mm gun [R], AD-A118 376/3, 1982.
- [7] 芮筱亭, 俞来峰, 王国平, 等. 弹药发射安全性导论 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 24-26.  
RUI Xiao-ting, YUN Lai-feng, WANG Guo-ping, et al. Direction to Launch Safety of Ammunition [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009: 24-26.
- [8] 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, 75: 102-105.  
JING Zhi-ming, WENG Chun-sheng. Charge Design Safety of Guns [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001, 75:

- 102-105.
- [9] 吴长水, 张小兵, 袁亚雄. 分形理论在火药破碎研究中的应用展望[J]. 火炸药学报, 2005, 28(3): 20-22.  
WU Chang-shui, ZHANG Xiao-bing, YUAN YA-xiong. Prospects of application of fractal theory in research of grain fracture [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2005, 28(3): 20-22.
- [10] 芮筱亭, 俞来峰, 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): 690-694.  
RUI Xiao-ting, YUN Lai-feng, SHA Nan-sheng, et al. Advance on launch safety for gun propellant charge[J]. *Acta Armamentarii*, 2005, 26(5): 690-696.
- [11] 金志明. 枪炮内弹道学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2004: 19-20.  
JIN Zhi-ming. Interior ballistics of guns [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2004: 19-20.

## Characterization Method for Fragmentation Degree of Propellant Charge

WANG Yan<sup>1</sup>, RUI Xiao-ting<sup>1</sup>, FENG Bin-bin<sup>1</sup>, CHEN Tao<sup>2</sup>, WANG Guo-ping<sup>1</sup>

(1. Institute of Launch Dynamics, NUST, Nanjing 210094, China; 2. Mechanics Experiment Center, NUST, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** To characterize the fragmentation degree of propellant charge quantitatively, the concepts of dynamic vivacity ratio and initial dynamic vivacity ratio (IDVR) were introduced. The dynamic vivacity ratio, which is the ratio of burning surface area of fragmented propellant charge to the corresponding not-fragmented propellants charges, and IDVR, which is the ratio of burning surface area of fragmented propellant charge to the corresponding not-fragmented propellants charges at the initial time were deduced using the gas state equations of the closed bomb. The close bomb tests were done with three kinds of petal propellants with 19 holes and different lengths of 13.6 mm, 10 mm and 5 mm. The  $p-t$  curves of the propellants with different lengths were obtained. The IDVR of the corresponding propellants was gained by processing the  $p-t$  curves. The initial surface area of propellants with different lengths was obtained via calculation based on the geometrical shape, and then the IDVRs of the propellants were obtained. Results show that the IDVRs' results of tests are close to the calculated values, showing that the IDVR of the propellant can denote the fragmentation degree of fragmented propellant charge quantitatively.

**Key words:** ordnance science and technology; propellant charge; fragmentation degree; dynamic vivacity ratio; initial dynamic vivacity ratio (IDVR)

**CLC number:** TJ55

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/j.issn.1006-9941.2015.01.012



## 《含能材料》高品质炸药晶体研究专栏征稿

高品质炸药晶体的出现为钝感弹药的研究与应用开辟了一条重要途径,高品质炸药晶体因而也成为目前国内外含能材料研究领域的热点之一。为促进高品质炸药晶体的研究和应用,《含能材料》将于2015年开设高品质炸药晶体研究专栏,专题报道高品质炸药晶体的制备、表征、性能、应用等领域的最新研究成果,促进学者间的交流。欢迎相关研究学者投稿。来稿建议为英文。来稿时请选择对应的专栏。

《含能材料》编辑部