

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2019.02.003

# 基于燃气生成速率比的发射药破碎程度 定量表征方法<sup>\*</sup>

陈言坤 马士洲 汪海涛 白云  
军事科学院防化研究院(北京,102205)

[摘 要] 为定量表征发射药的破碎程度,引入了燃气生成速率比的概念。通过理论推导,得出燃气生成速率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。提出采用破碎发射药燃烧前期的燃气生成速率比的平均值来定量表征发射药的破碎程度。对标准发射药、大块发射药、小块发射药和粉末发射药进行了密闭爆发器试验,获得了不同发射药的 $p-t$ 曲线,数据处理得到不同发射药破碎程度的量化值。结果表明,基于燃气生成速率比的发射药破碎程度定量表征方法是可行的。

[关键词] 发射药;破碎程度;燃气生成速率比;密闭爆发器

[分类号] TJ410;O34

## Quantitative Characterization Method for Fragmentation Degree of Propellant Based on Ratio of Gas Generation Rates

CHEN Yankun, MA Shizhou, WANG Haitao, BAI Yun  
Institute of Chemical Defense, PLA Academy of Military Science (Beijing, 102205)

[ABSTRACT] To characterize fragmentation degree of propellant quantitatively, ratio of gas generation rates was introduced. It was deduced that the ratio of gas generation rates is correlated to the ratio of burning surface area of crushed propellant to that of the standard propellant. Fragmentation degree of propellant is characterized with the average value of the ratio of gas generation rates at the initial time. Closed-bomb test was used to test the standard propellant, massive propellant, bite-size propellant and powdered propellant, and the curves of the different propellants were obtained. The quantitative value of the fragmentation degree of propellant was obtained by processing the  $p-t$  curves. Results show that the quantitative characterization method for fragmentation degree of propellant based on the ratio of gas generation rates is feasible.

[KEYWORDS] propellant; fragmentation degree; ratio of gas generation rates; closed-bomb

## 引言

经过多年研究,国内外对发射装药引起膛炸的机理已形成共识,即: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,发生破碎,使发射装药燃面增加,燃气生成速率猛增,导致弹道起始段膛压猛增,产生膛炸<sup>[1-9]</sup>。因此,定量描述发射装药被点燃前的破碎程度对研究发射装药的发射安全性具有重要意义。

破碎发射药对膛内压力的影响主要通过其初始燃烧面积的增加来体现,发射药的破碎程度与其初

始燃烧面积的大小密切相关。破碎后的发射药形状、尺寸不一,难以通过理论计算直接得到破碎发射药的表面积。金志明等<sup>[10]</sup>提出了发射药破碎度的概念,即用破碎后发射药的燃烧面积与其标准发射药燃烧面积之比表示发射药的破碎程度,对于破碎不规则的药粒采取近似为球形的办法计算其表面积,通过这种方法计算得到的破碎发射药的表面积会存在较大误差。文献<sup>[11-12]</sup>提出利用起始动态活度比表征发射装药的破碎程度。

为定量表征发射药的破碎程度,文章中,引入燃气生成速率比的概念,即破碎后发射药燃气生成速率与破碎前的比值,并通过理论推导和密闭爆发器

<sup>\*</sup> 收稿日期:2018-12-19

第一作者:陈言坤(1985-),男,博士,工程师,主要研究方向:弹药设计理论与技术。E-mail: cyk19860110@163.com

通信作者:马士洲(1977-),男,助理研究员,主要研究方向:军事化学与烟火技术。E-mail: 13910011793@139.com

试验论证了燃气生成速率比表征发射药破碎程度的科学性和可行性。

## 1 发射药燃气生成速率比与燃烧表面积比的关系

由几何燃烧定律可知:

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{1}{V_1} \cdot \frac{dV}{dt} = \frac{\rho}{\omega} \cdot \frac{dV}{dt} \quad (1)$$

式中:  $\psi$  为发射药燃去百分比, 即已燃烧的发射药质量与原质量的比;  $d\psi/dt$  代表单位时间内的气体生成量, 称为气体生成速率;  $V_1$  为单粒药粒的原体积,  $m^3$ ;  $V$  为单粒药粒的已燃体积,  $m^3$ ;  $\omega$  为装药量,  $kg$ ;  $\rho$  为发射药密度,  $kg/m^3$ 。

其中,

$$\frac{dV}{dt} = \frac{Sde}{dt} \quad (2)$$

式中:  $S$  为发射药燃烧瞬间的表面积,  $m^2$ ;  $de/dt$  为单位时间内沿垂直药粒表面方向燃烧掉的药粒厚度,  $m/s$ , 称为发射药线燃烧速度。

由式(1)和式(2)得

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{\rho S}{\omega} \cdot \frac{de}{dt} \quad (3)$$

定容情况下的发射药气体状态方程为<sup>[13]</sup>:

$$p_\psi = \frac{f\Delta\psi}{1 - \frac{\Delta}{\rho} - (\alpha - \frac{1}{\rho})\Delta\psi} \quad (4)$$

式中:  $p_\psi$  为发射药燃去百分比为  $\psi$  时的压力值,  $MPa$ ;  $f$  为火药力,  $kJ/kg$ ;  $\Delta$  为装填密度,  $kg/m^3$ ;  $\alpha$  为发射药气体余容,  $m^3/kg$ 。

对于发射药的密闭爆发器试验, 火药力  $f$ 、装填密度  $\Delta$  和发射药气体余容  $\alpha$  均为定值, 密闭爆发器压力值  $p_\psi$  和发射药燃去百分比  $\psi$  是一一对应的。因此, 对于装填条件一致、仅在发射药形状尺寸上存在差异的不同破碎程度发射药的密闭爆发器试验, 同一压力值  $p_\psi$  对应的发射药燃去百分比  $\psi$  也是相同的。

在相同压力、相同燃去百分比条件下, 破碎发射药与标准发射药(未破碎的正常发射药)的燃气生成速率比  $R_F$  可表示为:

$$R_F = \frac{\frac{d\psi'}{dt}}{\frac{d\psi}{dt}} = \frac{\frac{\rho' S' de'}{\omega' dt}}{\frac{\rho S de}{\omega dt}} \quad (5)$$

式中:  $d\psi/dt$ 、 $S$ 、 $de/dt$ 、 $\rho$  和  $\omega$  分别表示标准发射药的燃气生成速率、燃烧瞬间的表面积、线燃烧速度、

发射药密度和装药量;  $d\psi'/dt$ 、 $S'$ 、 $de'/dt$ 、 $\rho'$  和  $\omega'$  分别表示破碎发射药的燃气生成速率、燃烧瞬间的表面积、线燃烧速度、发射药密度和装药量。

在相同质量、相同组分的装药条件下,  $\omega = \omega'$ ,  $\rho = \rho'$ 。发射药的线燃烧速度仅是压力的函数, 因此在相同的燃烧压力条件下, 其线燃烧速度也是相同的, 即  $de/dt = de'/dt$ 。故式(5)可化为:

$$R_F = \frac{S'}{S} \quad (6)$$

由式(6)可知, 燃气生成速率比可以描述为在相同燃烧压力和相同燃去百分比条件下破碎发射药与标准发射药的瞬时燃烧表面积之比。

## 2 燃气生成速率比的数据处理方法

燃气生成速率比的数据处理步骤为:

1) 通过密闭爆发器试验分别测得标准发射药和破碎发射药的压力-时间曲线( $p-t$  曲线)。

2) 利用式(4), 可计算试验测得的各点压力对应的发射药燃去百分比  $\psi$ , 进而可得到燃气生成速率  $d\psi/dt$ , 即由  $p-t$  曲线可通过数据处理得到  $(d\psi/dt)-t$  曲线。

3) 结合  $p-t$  曲线和  $(d\psi/dt)-t$  曲线可得到  $(d\psi/dt)-B$  曲线, 其中,  $B$  为相对压力, 其表达式为:

$$B = \frac{p_i}{p_m} \quad (7)$$

式中:  $p_i$  为密闭爆发器试验中某时刻测得的压力值,  $MPa$ ;  $p_m$  为密闭爆发器试验的最大压力值,  $MPa$ 。

4) 取同一  $B$  相应的  $d\psi'/dt$  和  $d\psi/dt$ , 由式(5)计算得到破碎发射药的燃气生成速率比。

本研究中, 探索用燃气生成速率比定量描述发射药的破碎程度, 主要是为了研究不同破碎程度的发射药对内弹道性能的影响, 尤其是对最大膛压的影响; 因此, 有必要深入分析发射药在膛内的燃烧过程和特点。

在发射药燃烧前期, 也是内弹道的起始阶段, 弹丸速度较小, 弹后空间增加缓慢, 压力上升较快, 上升的压力继而又加速发射药的燃烧, 使得发射药燃气生成更快。随着弹丸速度增加, 弹后空间的增加速度不断加快, 当膛压降低因素(弹丸运动)正好抵消膛压增加因素(发射药燃烧)时, 膛内压力达到最大值。在最大膛压点以后, 弹丸速度越来越大, 膛压开始逐渐下降, 直至弹丸出炮口。由此可知, 发射药燃烧前期的燃烧特性对最大膛压的影响最为显著。因此, 对发射药破碎程度的定量描述应主要依据破

碎发射药燃烧前期的燃烧特性。

通过解算某型高炮弹药的内弹道方程得到,膛内压力增长速度峰值处对应的发射药燃去百分比为 0.15,其最大膛压点处对应的发射药燃去百分比为 0.45。用相对压力  $B$  在区间  $[0.05,0.25]$  上步长为 0.05 对应的燃气生成速率比的平均值来定量描述发射药的破碎程度,其表达式为

$$\overline{R_F} = \frac{1}{5} \sum R_{FB=i} (i=0.05,0.10,0.15,0.20,0.25)。$$

(8)

由式(6)和式(8)可知, $\overline{R_F}$ 的物理意义为破碎发射药与标准发射药在燃烧前期时的燃烧表面积之比。

### 3 破碎发射药燃气生成速率比试验

#### 3.1 样品准备

试验用发射药为 11/7 单基粒状发射药,该发射药的火药力  $f=950\ 000\ \text{J/kg}$ ,发射药余容  $\alpha=1.0\times 10^{-3}\ \text{m}^3/\text{kg}$ ,燃速指数  $n=0.83$ ,燃速系数  $u_1=1.7\times 10^{-8}\ \text{m}/(\text{s}\cdot\text{Pa}^{0.83})$ ,其具体尺寸如表 1 所示。

表 1 11/7 粒状发射药的形状尺寸

Tab.1 Shaped size information of 11/7 granular propellant

燃烧厚度/ mm	外径/ mm	孔径/ mm	长度/ mm	孔数
1.05	5.70	0.50	15.00	7

文献[14-15]研究表明,采用底部点火条件下,药粒撞击弹底的速度为 51~100 m/s,利用压缩气体加速 11/7 单基粒状发射药(标准发射药),使发射药以约 77 m/s 的速度撞击钢板,收集撞击破碎后的发射药,采用 6 目和 12 目标准筛将破碎发射药分为大块、小块和粉末 3 个破碎等级(见图 1)。

#### 3.2 试验条件

密闭爆发器容积 106 mL,压力传感器的精度为 0.005 MPa,测压区间为 0~350 MPa,采样时间间隔为 0.05 ms,装填密度为 0.2 g/cm<sup>3</sup>,点火药采用 2<sup>#</sup>硝化棉(火药力为 912 000 J/kg,余容为 1.0×10<sup>-3</sup> m<sup>3</sup>/kg),点火压力取 9.8×10<sup>6</sup> Pa,点火药量的计算公式为

$$\omega_B = \frac{V_0 p_B (1 - \frac{\Delta}{\rho})}{f_B}。$$

(9)

式中: $V_0$ 为密闭爆发器容积,L; $\rho$ 为发射药密度,g/cm<sup>3</sup>; $\omega_B$ 为点火药量,g; $p_B$ 为点火药压力,Pa; $f_B$ 为



(a) 大块



(b) 小块



(c) 粉末

图 1 破碎发射药图片

Fig.1 Photographs of crushed propellant

点火药火药力,J/kg; $\Delta$ 为发射药装填密度,g/cm<sup>3</sup>。

#### 3.3 试验结果与分析

对标准发射药、3 个不同破碎等级的发射药分别进行密闭爆发器试验,测得其压力-时间曲线( $p-t$ 曲线)如图 2 所示。根据  $p-t$  曲线,通过数据处理可得到  $(d\psi/dt)-B$  曲线,如图 3 所示。

依据  $(d\psi/dt)-B$  曲线数据,由式(5)计算得到的

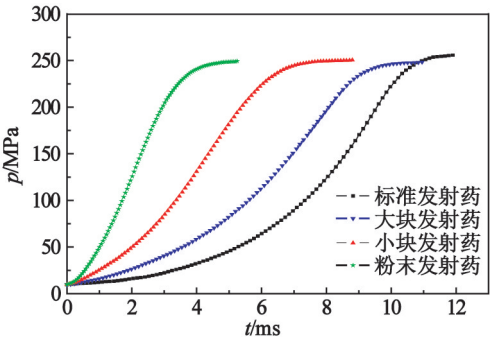


图 2 发射药的  $p-t$  曲线

Fig.2  $p-t$  curves of propellant



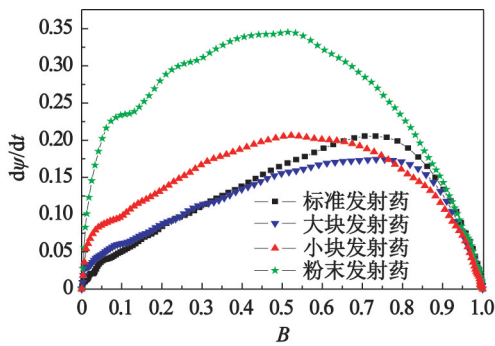


图 3 发射药的  $(d\psi/dt)$ - $B$  曲线  
Fig.3  $(d\psi/dt)$ - $B$  curves of propellant

破碎发射药在不同相对压力  $B$  时的燃气生成速率比,如表 2 所示。

表 2 破碎发射药的燃气生成速率比  
Tab.2 Ratio of gas generation rates  
of crushed propellant

$B$	大块	小块	粉末
0.05	1.259 0	2.317 4	5.389 0
0.10	1.215 8	1.934 9	4.636 9
0.15	1.084 2	1.752 6	3.703 0
0.20	1.032 2	1.593 8	3.380 3
0.25	1.020 0	1.543 4	3.090 3

依据表 2 中的数据,由式(8)计算得到的大块发射药、小块发射药和粉末发射药的破碎程度量化值如表 3 所示。

表 3 不同破碎等级发射药的破碎程度量化值  
Tab.3 Fragmentation degree value of  
different crushing level propellant

参数	大块	小块	粉末
$R_f$	1.122 2	1.828 4	4.039 9

由表 3 中数据可知,在发射药燃烧前期,大块发射药的燃烧表面积比标准药增加了 12.22%;小块发射药的燃烧表面积比标准药增加了 82.84%,几乎增加一倍,对发射药燃气生成规律影响较大;粉末发射药的燃烧表面积是标准药的 4 倍多,对发射药燃气生成规律影响显著。

4 结论

1)理论推导了燃气生成速率比就是破碎发射装药与标准发射装药的燃烧表面积比,提出采用破碎发射药燃烧前期的燃气生成速率比的平均值来定量表征发射药的破碎程度。

2)对标准发射药、大块发射药、小块发射药和粉末发射药进行了密闭爆发器试验,通过数据处理得到大块发射药、小块发射药和粉末发射药的破碎程度量化值分别是为 1.122 2、1.828 4 和 4.039 9。

发射药破碎是导致膛炸的一个重要因素,本文中提出的发射药破碎程度的定量表征方法为发射药发射安全性评估提供了方便的测试方法。

参 考 文 献

[1] 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 L F, RUI X T, WANG H, et al. Discussion about mechanism of breech-blow caused by propellant [J]. Acta Armamentarii, 2007, 28(2): 153-157.

[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 X T, YUN L F, SHA N S, et al. Advance on launch safety for gun propellant charge[J]. Acta Armamentarii, 2005, 26(5): 690-696.

[3] 陈言坤,甄建伟,武慧恩,等. 粒状发射药动态破碎研究进展[J]. 爆破器材, 2014, 43(1): 43-48.  
CHENG Y K, ZHEN J W, WU H E, et al. Research progress of dynamic fracture of granular propellant[J]. Explosive Materials, 2014, 43(1): 43-48.

[4] 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 X T, FENG B B, WANG G P. Evaluation method of launch safety of propellant charge[J]. Ordnance Industry Automation, 2011, 30(5): 56-59, 71.

[5] 负来峰. 发射装药发射安全性评定方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008.  
YUN L F. Study on the method of evaluating the launch safety for gun propellant charge[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2008.

[6] 徐浩,芮筱亭,郁兆华,等. 发射装药挤压应力与破碎规律研究[J]. 火炸药学报, 2012, 35(4): 61-64, 68.  
XU H, RUI X T, YU Z H, et al. Study on extrusion stress and fracture law of propellant charge[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellant, 2012, 35(4): 61-64, 68.

[7] 冯宾宾,芮筱亭,徐浩,等. 发射过程中某硝胺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 B B, RUI X T, XU H, et al. Dynamic compression fracture condition of one nitramine propellant charge

during launch courage[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellant, 2012, 35(2): 70-73,85.

[8] 王燕, 芮筱亭, 陈涛, 等. 发射药床初始堆积形态对破碎程度的影响[J]. 火炸药学报, 2013, 36(4): 53-56,86.

WANG Y, RUI X T, CHEN T, et al. Effect of initial packing pattern on fragmentation degree of propellant beds [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellant, 2013, 36(4): 53-56,86.

[9] 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 S P, RUI X T, HONG J, et al. Simulation on fragmentation process of propellant bed under impact load [J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2011, 32(4): 419-425.

[10] 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, 2001:75-78.

JIN Z M, WENG C S. Charge design safety of guns [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001: 75-78.

[11] 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 T, RUI X T, YUN L F. Method of describing fracture degree of propellant[J]. Journal of Ballistics, 2008, 20(2): 99-102.

[12] 王燕, 芮筱亭, 冯宾宾, 等. 发射装药破碎程度表征方法研究[J]. 含能材料, 2015, 23(1): 57-61.

WANG Y, RUI X T, FENG B B, et al. Characterization method for fragmentation degree of propellant charge [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2015, 23(1): 57-61.

[13] 张小兵, 金志明. 枪炮内弹道学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2014:13-17.

ZHANG X B, JIN Z M. Interior ballistics of guns[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2014: 13-17.

[14] 邹瑞荣, 袁亚雄, 金志明, 等. 火炮点火初期膛内火药床运动规律研究[J]. 南京理工大学学报, 1994(2): 33-37.

ZOU R R, YUAN Y X, JIN Z M, et al. A study of the movement of propellant at the initial ignition stage in guns[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology, 1994(2): 33-37.

[15] 叶敏. 火炮膛内药床撞击与挤压的实验研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2007.

YE M. Experiment research of propellant impact and compression in the bore[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007.



(上接第 14 页)

5) Considering the above results it was so dangerous to treat this kind of pyrotechnics mixture, and we should handle them with more carefully.

References

[1] HATANAKA S, MIYAHARA A. Sensitivity on the bangers containing aluminum powder[J]. Industrial Explosives, 1989,150(6):498-503.

[2] Kagoshima City Fire Department. Summary of explosive fire at a factory of fire-works[R]. 2003.

[3] OGAWA T. Recent accidents of energetic materials[C]//Proceedings of 3rd NRIFD Symposium. Mitaka Tokyo, Japan, 2004:97-103.

[4] KOSEKI H, SUZUKI Y. Evaluation test results of raw pyrotechnics mixtures[C]//8th International Symposium on Fire Works. 2004:192-202.

[5] National Astronomical Observatory. Rika Nenpyo (Chronological Scientific Tables) 2002 [Z]. Maruzen Co. , 2001.

[6] NIIS. Report of hydroxylamine accident at Nishin Chemical Industry Co. ,Ltd: A-2000-1[R]. 2001.

[7] KERSTEN R, MAK W. Explosion hazards of ammonium nitrate: How to assess the risks[C]//Proceedings of 3rd NRIFD Symposium. Mitaka, Tokyo, Japan, 2004: 113-125.

[8] KITAGAWA T. Chemical safety engineering[M]. Tokyo: Nikkan Kogyo Shinbun Co. , Ltd. , 1974.

[9] TAMURA M, ARAI M, AKUTSU Y. Energetic materials and safety[M]. Tokyo: Asakura Syoten, 1999.

[10] Japanese Society of Industrial Explosive. Industrious explosives[M]. 1989.