

文章编号: 1001-1455(2013)03-0292-05

破碎发射药形状特征量的计算方法^{*}

冯宾宾¹, 芮筱亭¹, 负来峰^{1,2}, 王 燕¹

(1. 南京理工大学发射动力学研究所, 江苏 南京 210094;

2. 总装备部南京军事代表局, 江苏 南京 210024)

摘要: 分析了发射药形状特征量与密闭爆发器试验中发射药的燃烧压力曲线之间的关系, 提出了估算破碎发射药形状特征量的方法, 并给出了确定发射药形状特征量的详细步骤。对通过落锤实验得到的不同破碎程度的发射药进行了密闭爆发器实验, 并利用建立的方法计算了该发射药的形状特征量, 计算结果与实验结果吻合较好。

关键词: 爆炸力学; 形状特征量; 密闭爆发器; 发射药; 破碎

中图分类号: O381

国标学科代码: 1303510

文献标志码: A

发射装药的挤压破碎是导致膛炸、膛胀的根本原因^[1-2]。发射过程中, 当发射装药在点传火激励作用下发生大规模破碎时, 发射装药燃烧面积大量增加, 致使膛内局部气体生成速率增大而产生超高压, 严重时导致膛炸事故发生。

对于发射装药破碎对膛内压力的影响已有了大量的数值模拟研究^[3-6], 为装药设计提供了有效参考。发射药形状特征量是内弹道计算必须解决的问题。以往通过假设发射药破碎为形状均匀的药粒, 或采用直接增加燃气生成速率, 考虑发射药破碎对弹道性能的影响^[5-6]。这些处理结果与实际破碎发射药的燃烧规律相差较大, 难以准确反映真实破碎发射药对膛压的影响。本文中, 研究一种确定破碎发射药等效形状特征量的方法, 为建立伴随发射药挤压破碎过程的两相流内弹道动力学模拟提供先决条件, 为发射装药发射安全性研究提供重要的技术支撑。

1 形状特征量

通常假设发射药燃烧服从几何燃烧定律, 燃速服从指数燃速定律, 即:

$$\psi = f(Z) = \begin{cases} \chi Z(1 + \lambda Z + \mu Z^2) & Z \leq 1 \\ \chi_s Z(1 + \lambda_s Z) & 1 < Z \leq Z_k \\ 1 & Z > Z_k \end{cases} \quad (1)$$

$$Z = \frac{e}{e_1} \quad (2)$$

$$\frac{dZ}{dt} = \frac{r}{e_1} \quad (3)$$

$$r = u_1 p^\nu \quad (4)$$

式中: $\chi, \lambda, \mu, \chi_s, \lambda_s$ 为发射药的形状特征量, e_1 为发射药厚度的一半, e 为发射药燃烧厚度, Z 为相对燃烧厚度, ψ 为相对燃烧体积, r 为燃烧速度, u_1 为燃速系数, ν 为燃速指数。

在内弹道计算中, u_1, ν 可由密闭爆发器实验确定, e_1 和形状特征量 $\chi, \lambda, \mu, \chi_s, \lambda_s$ 由发射药的药粒形状尺寸计算得到。对于未破碎发射药粒, 形状函数 $f(Z)$ 由几何燃烧定律假设、通过发射药粒几何形状计算获得; 对于破碎的发射药粒, 则需要通过某种方法确定 $f(Z)$, 即确定式(1)中的发射药形状特征量。

* 收稿日期: 2012-01-12; 修回日期: 2012-02-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(11102089); 新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-10-0075)

作者简介: 冯宾宾(1985—), 男, 博士研究生。

破碎发射药通常呈现各种各样不规则的形状,难以通过几何方法直接计算发射药的形状特征参量,因而无法直接对破碎后的发射药进行内弹道计算。解决这一难题可能的办法有2种:(1)从理论上建立发射药床的挤压破碎力学模型^[7],直接根据药粒在膛内受挤压破碎后的形状计算其形状特征量;(2)先通过发射药床的挤压破碎物理模拟实验获得挤压破碎后的发射药,然后对破碎发射药进行密闭爆发器实验,再利用密闭爆发器燃烧动力学方程符合计算等效的形状特征量。目前,根据药粒形状准确计算破碎发射药的形状特征量还无法实现,用方法(2)获取破碎发射药的形状特征量较可靠。

2 样品准备

使用落锤撞击破碎实验获得某发射药的破碎样品。为了得到不同破碎程度的发射药样品,发射药粒的落锤撞击破碎实验依据落锤质量、高度和药粒温度、摆放姿态共分5个工况,每个工况下1组实验。由一次密闭爆发器实验所需发射药量和单个药粒质量确定,常温下每组实验51次,低温(-40℃)下每组实验46次,具体实验条件见表1。

表1 药粒冲击破碎实验条件

Table 1 Experimental impact conditions of propellant grain fracture

工况	m/kg	h/m	药温	姿态	次数
1	4.36	1.0	常温	轴向	51
2	8.30	1.0	常温	轴向	51
3	6.36	0.5	常温	轴向	51
4	6.36	0.5	低温	轴向	46
5	6.36	0.5	常温	横向	51

各工况下发射药冲击破碎形态各异,如图1所示。工况1~3为常温药粒承受轴向冲击,冲击较小情况下发射药仅表现为挤压变形和局部表面裂纹,冲击较大情况下药粒下部表现为挤压变形和表面裂纹,上部严重破裂。工况4为低温药粒承受轴向冲击,药粒下部破碎成小颗粒,上部破碎成粉末,明显比常温情况下破碎严重的多。工况5为常温药粒承受横向冲击,药粒破碎成薄片状或长条状。

(a) Case 3



(b) Case 4



(c) Case 5



图1 不同工况药粒破碎状况

Fig. 1 Fracture status of propellant grains in different cases

3 形状特征量的确定

3.1 压力曲线分析

对破碎发射药进行密闭爆发器实验,测得压力曲线,如图2(a)所示。图中 p 为压力, t 为时间, p_0 为点火压力, p_{\max} 为最大压力。

密闭爆发器实验中,若不考虑热散失的影响,发射药燃烧结束时压力达到最大。此时, $t=t_k$, $p=p_{\max}$, $Z=Z_k$, $\psi=1$,由式(1)得

$$\chi_s Z_k (1 + \lambda_s Z_k) = 1 \quad (5)$$

在图 2(a)中, S 表示多孔发射药燃烧分裂点。此时, $t=t_s, p=p_s, Z=1, \psi=\psi_s$, 由式(1)得

$$\psi_s = \chi(1 + \lambda + \mu) \quad (6)$$

$$\psi_s = \chi_s(1 + \lambda_s) \quad (7)$$

按照发射药动态活度定义, 将压力曲线处理为动态活度曲线。发射药动态活度定义为

$$L = \frac{dp/dt}{p p_{\max}} \quad (8)$$

假设点火药在点火后瞬间燃尽, 根据 GJB 770B-2005《火药试验方法》中点火药量计算方法可以估算点火压力 p_b 。如图 2(b)所示, 密闭爆发器实验实测的压力曲线都存在拐点, 多孔火药应力曲线的拐点接近于分裂点^[8], 这里用拐点处 ψ_c 近似表征 ψ_s , 此时对应的压力及时间分别为分裂点压力 p_s 和分裂点时间 t_s 。发射药的厚度越厚, 则燃烧时间越长, 可由 t_s 初步估算 e_1 , 而后可由 t_k/t_s 初步估算 Z_k , 由式(5)和(7)可估算出 χ_s, λ_s 。

根据动态活度曲线(见图 2(c)), 可初步判断破碎发射药的大致形状, 近似地估算 χ 和 λ, μ 。具体办法是: 根据动态活度曲线的起始值和起始段估算 χ , 起始值和起始段越高, χ 越大; 根据动态活度曲线的变化趋势和呈现的发射药燃面增减性估算 λ , 增面性为正, 减面性为负, 增面性越大, λ 越大; 将估算的 χ, λ 和 ψ_s 代入式(6), 可得 μ 。

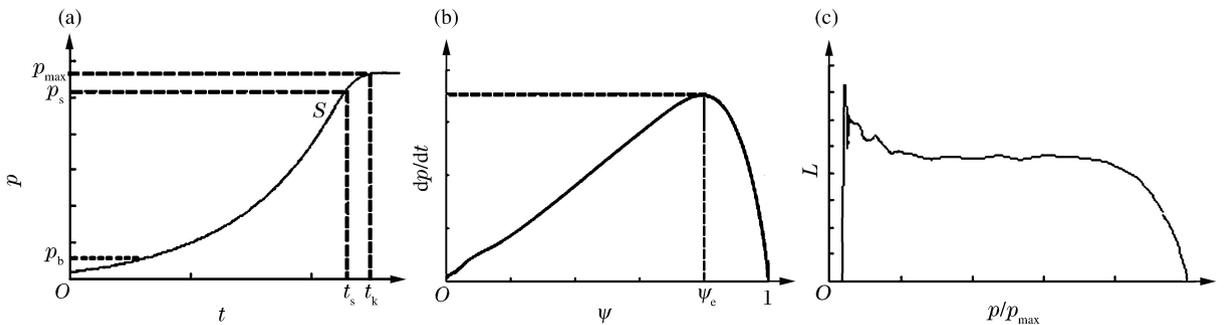


图 2 发射药的压力、动态活度曲线示意图

Fig. 2 Schematic diagram of pressure curve and dynamic vivacity curve of propellant

3.2 特征量的符合计算

如前所述, 根据压力曲线和动态活度曲线估算 e_1, Z_k 和形状特征量 $\chi, \lambda, \mu, \chi_s, \lambda_s$ 后, 还需要利用密闭爆发器内弹道方程进行多次符合计算, 才能更准确地确定这些参数。

步骤如下:

(1) 将估算的 $e_1, Z_k, \chi, \lambda, \mu, \chi_s, \lambda_s$, 代入密闭爆发器内燃烧动力学方程, 计算压力曲线和动态活度曲线。

(2) 对比计算与实测的压力曲线。最大压力 p_{\max} 只与密闭爆发器容积、发射药质量、能量等参数相关, 与发射药形状无关。若点 S 不一致, 调整 e_1 , 若最大压力的位置不一致, 调整 Z_k , 然后计算 χ_s, λ_s 。

(3) 对比计算与实测的动态活度曲线。若起始值和起始段不一致, 调整 χ , 若变化趋势不一致, 调整 λ , 然后计算 μ 。

(4) 用调整后的 $e_1, Z_k, \chi, \lambda, \mu, \chi_s, \lambda_s$ 代替估算值, 重复上述步骤, 直至计算与实测的压力曲线和动态活度曲线基本重合。

用上述步骤, 一般进行 4~6 次符合计算, 就可使计算与实验结果较好吻合, 可得破碎发射药的形状特征量。

分别对工况 1~5 的药粒冲击破碎实验所获得的破碎发射药样品, 进行密闭爆发器实验, 并用所提出的方法符合计算了各自的形状特征量。部分实验与符合计算的压力曲线和动态活度曲线的对比情况如图 3~4 所示, 可见计算与实验结果较好吻合。相应的破碎发射药形状特征量的计算结果, 见表 2。

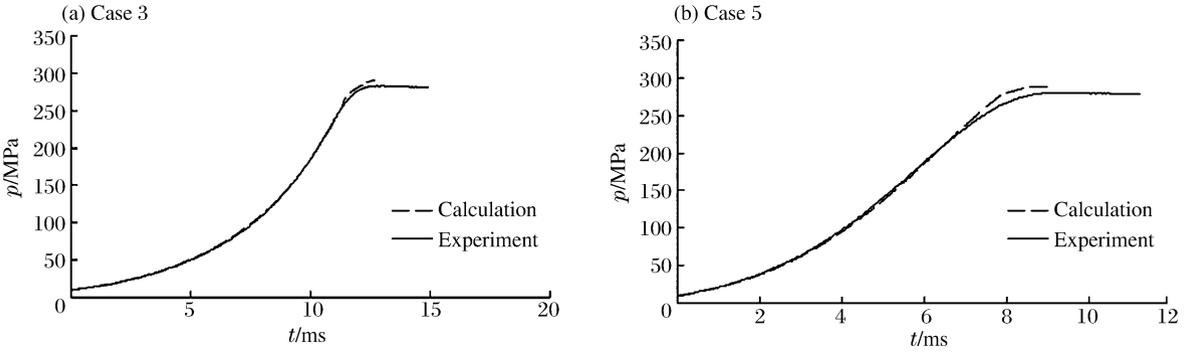


图3 发射药的压力曲线结果
Fig. 3 Pressure curves of propellant

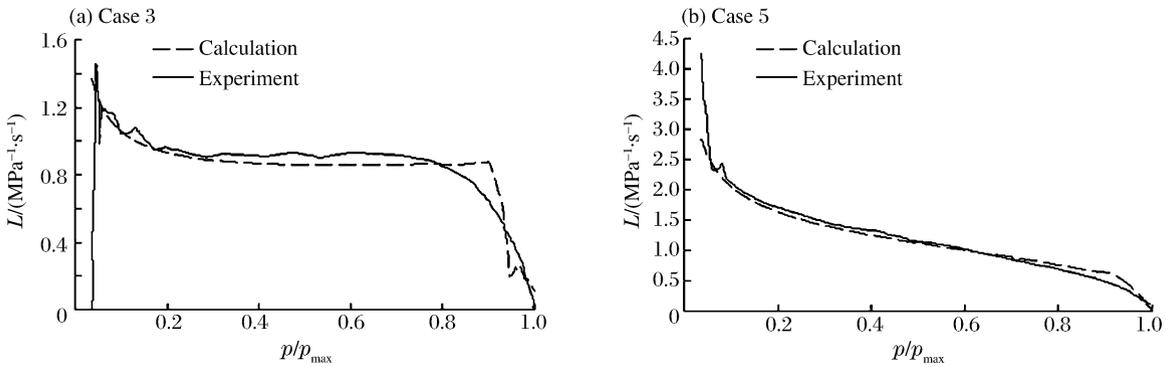


图4 发射药的动态活度曲线结果
Fig. 4 Dynamic vivacity curves of propellant

表2 破碎发射药特征参数计算结果

Table 2 Computed characteristic parameters of fractured propellant

工况	e_1/mm	Z_k	χ	λ	μ	χ_s	χ_s
1	0.72	1.476	0.874	0.040	-0.016	1.351	-0.338
2	0.71	1.484	1.104	-0.128	-0.037	1.432	-0.357
3	0.88	1.243	0.750	0.290	-0.044	1.471	-0.365
4	1.16	1.000	3.000	-1.000	0.333	1.000	0
5	0.71	1.317	1.281	-0.157	-0.091	1.603	-0.400

4 结 论

研究了破碎发射药密闭爆发器压力曲线的特征参数,通过密闭爆发器内燃烧动力学方程符合计算,以及比对压力曲线和动态活度曲线,提出了一种确定破碎发射药形状特征量的方法。以某发射药为例,进行了多种工况下的药粒冲击破碎实验,用所提出的方法对不同破碎程度发射药样品的形状特征量进行了计算,计算与实验结果较好吻合。

参考文献:

[1] 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 Jun-yun, Yuan Ya-xiong, Zhang Xiao-bing. 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.

[2] 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):690-696.
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.

- [3] Keller G E, Horst A W. The effects of propellant grain fracture on the interior ballistics of guns[R]. AD-A209 007/4/GAR, 1989.
- [4] Stiefel L. 火炮发射技术[M]. 杨葆新等,译. 北京:兵器工业出版社,1993:76-80.
- [5] 翁春生,金志明,袁亚雄,等. 火药破碎对压力异常影响的数值模拟[J]. 弹道学报,1996,8(4):13-18.
Weng Chun-sheng, Jin Zhi-ming, Yuan Ya-xiong, et al. Numerical studies on the influence of grain fracture on abnormal pressure in guns[J]. Journal of Ballistics, 1996,8(4):13-18.
- [6] 贡来峰,芮筱亭,王国平,等. DCD 格式在破碎发射药床两相流内弹道计算中的应用[J]. 爆炸与冲击,2010,30(3):295-300.
Yun Lai-feng, Rui Xiao-ting, Wang Guo-ping, et al. Application of DCD scheme to computation of two-phase flow interior ballistics for fractured propellant bed[J]. Explosion and Shock Waves, 2010,30(3):295-300.
- [7] 洪俊,芮筱亭,刘军,等. 散粒体发射药床碰撞挤压过程三维数值模拟研究[J]. 兵工学报,2007,28(3):305-308.
Hong Jun, Rui Xiao-ting, Liu Jun, et al. Three dimensional numerical simulation on collision and press process of propellant bed[J]. Acta Armamentarii, 2007,28(3):305-308.
- [8] 金志明. 枪炮内弹道学[M]. 北京:北京理工大学出版社,2004:19-34.

A computational method for shape characteristic parameters of fractured propellant in grain form *

Feng Bin-bin¹, Rui Xiao-ting¹, Yun Lai-feng^{1,2}, Wang Yan¹

(1. *Institute of Launch Dynamics, Nanjing University of Science and Technology,
Nanjing 210024, Jiangsu, China;*

2. *Military Representative Bureau in Nanjing, General Armament Department of PLA,
Nanjing 210024, Jiangsu, China*)

Abstract: By analyzing the relationships between the shape parameters of propellant grain and the pressure-time curve in a closed bomb, a computational method was established for estimating the shape characteristic parameters of fractured propellant in grain form and the detailed calculation steps were given. The propellants with different fracture degrees obtained in drop weight tests were tested in a close bomb and the corresponding shape characteristic parameters were calculated by using the established method. The calculated results are in agreement with the experimental ones.

Key words: mechanics of explosion; shape characteristic parameters; closed bomb; propellant; fracture

* Received 12 January 2012; Revised 26 February 2012

Supported by the National Natural Science Foundation of China (11102089)

Corresponding author: Rui Xiao-ting, ruixt@163.net