

破碎发射药等效形状函数的确定方法

陈琪, 杨富锋, 芮筱亭, 王燕

(南京理工大学 发射动力学研究所, 南京 210094)

摘要:为了准确表征破碎发射药在火炮膛内的燃气生成规律,提出了确定破碎发射药的等效形状函数的方法。通过密闭爆发器试验模拟不同破碎程度发射药在真实的膛内环境下膛压与时间的变化关系,得到破碎发射药等效形状函数,并定性分析了其与起始动态活度比的关系。该方法所得的等效形状函数能体现破碎发射药的燃烧特性,为考虑破碎的两相流内弹道研究提供了一种新方法。

关键词:破碎发射药;形状函数;密闭爆发器;起始动态活度比

本文引用格式:陈琪,杨富锋,芮筱亭,等.破碎发射药等效形状函数的确定方法[J].兵器装备工程学报,2016(12):45-47.

Citation format:CHEN Qi, YANG Fu-feng, RUI Xiao-ting, et al. Determination Method for Equivalent Shape Functions of Fractured Propellants[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2016(12):45-47.

中图分类号:TJ301

文献标识码:A

文章编号:2096-2304(2016)12-0045-03

Determination Method for Equivalent Shape Functions of Fractured Propellants

CHEN Qi, YANG Fu-feng, RUI Xiao-ting, WANG Yan

(Institute of Launch Dynamics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to accurately describe gas generation rule of the fractured propellant, a new method of determining the equivalent shape functions was presented. The propellant grains with different fracture degree were tested in closed bomb for the correspondence relationship between chamber pressure and time. The equivalent shape functions were derived. The relation between the equivalent shape functions and the initial dynamic vivacity ratios was analyzed. The result shows that the equivalent shape functions based on the method can characterize the fractured propellant. The study provides a new method for the dynamics of the two-phase flow in interior ballistic.

Key words: fractured propellant; equivalent shape function; closed bomb; initial dynamic vivacity ratio

近几年的研究表明,弹底发射药被点燃前受到颗粒间挤压应力作用药粒破碎,发射药燃烧面积增大,引起身管内压力异常增大是膛炸的根本原因^[1]。通过动态挤压破碎仿真实验装置已经可以再现膛内发射药床的力学环境和挤压破碎情况^[2]。起始动态活度比概念的提出,实现了对发射药破碎程度的定量分析研究^[3]。对于破碎发射药的实验模拟和理论研究已经较为成熟。负来峰等^[4]用DCD仿真计算了不同破碎程度发射药对发射安全性的影响,将挤压破碎的发射

药看作两种发射药组成的混合装药。王燕等^[5]建立了破碎发射药等效形状特征量的确定方法,得到破碎发射药已燃百分比与已燃厚度的关系。

形状函数表达了火药燃气生成量随药粒厚度的变化规律,对内弹道两相流仿真具有重要作用。为了更好地将破碎发射药引入内弹道两相流仿真计算中,在之前研究的基础上,利用发射装药动态挤压破碎试验和密闭爆发器试验的结果,研究确定破碎发射装药等效形状函数的方法,得到破碎

收稿日期:2016-07-22;修回日期:2016-08-15

基金项目:中国工程物理研究院基金项目(RMC2015B05)

作者简介:陈琪(1991—),男,硕士研究生,主要从事发射装药安全性研究。

发射药已燃百分比与相对已燃厚度的关系式,为考虑破碎的两相流内弹道仿真研究提供理论支持。

1 破碎发射药等效形状函数求解步骤

内弹道中,形状函数是建立在满足几何燃烧定律的理想化燃烧模型的基础上,多孔火药形状函数可表示

$$\psi = \begin{cases} \chi Z + \chi\lambda Z^2 + \chi\mu Z^3 & 0 \leq Z < 1 \\ \chi_s Z + \chi_s \lambda_s Z^2 & 1 \leq Z < Z_k \\ 1 & Z = Z_k \end{cases} \quad (1)$$

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

式中: χ, λ, μ 为发射药分裂前的形状特征量; χ_s, λ_s 为发射药分裂后的形状特征量; e_1 为发射药肉厚的一半; e 为发射药燃烧厚度; Z 为相对燃烧厚度; Z_k 为燃烧结束时的相对燃烧厚度; ψ 为发射药已燃百分比。

混合装药的等效形状函数的形式可以表示为各组分的形状函数线性叠加构成^[5]。而破碎发射药可以看成是多种形状不同的同质发射药组成的混合装药,因而破碎发射药的等效形状函数可表示为:

$$\psi = \begin{cases} a_1 Z + a_2 Z^2 + a_3 Z^3 & Z < 1 \\ b_0 + b_1 Z + b_2 Z^2 + b_3 Z^3 & 1 \leq Z < Z_k \\ 1 & Z = Z_k \end{cases} \quad (3)$$

式中: a_1, a_2, a_3 为破碎发射药等效分裂前的形状特征量; b_0, b_1, b_2, b_3 为破碎发射药等效分裂后形状特征量。

破碎发射药形状杂乱无规则,无法通过内弹道中推导形状特征量的方法得到其形状函数^[6-9],因此只能通过实验方法间接得出 $\psi - z$ 曲线,转而拟合出破碎发射药的等效形状特征量得到其等效形状函数。

求解步骤:

1) 通过破碎发射药的动态活度比实验得到 $p - t$ 曲线,结合定容情况下的火药气体状态方程

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

式中: p_ψ 为火药已燃百分比 ψ 对应时刻压力(Pa); f 为发射药的火药力(J/kg); Δ 为装填密度(kg/m^3); ρ_p 为发射药密度(kg/m^3); α 为气体余容(m^3/kg)。

将式(4)化简得

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

其中

$$\beta = 1 + (\alpha - 1/\rho_p) \frac{p}{f} \quad (6)$$

$$\beta_m = 1 + (\alpha - 1/\rho_p) \frac{p_m}{f} \quad (7)$$

式中 p_m 为压力最大值(Pa)。

通过式(5)确定火药已燃百分比与压力之间的对应关系,由于压力与时间的关系已知,进而得到已燃百分比与时

间的对应关系,即 $\psi - t$ 曲线。

2) 根据已知的 $p - t$ 曲线,结合燃速方程的指数函数形式

$$\dot{r} = \frac{de}{dt} = u_1 p^n \quad (8)$$

式中: u_1 为燃速常数; n 为燃速指数。

对式(8)积分即可得到 $e - t$ 曲线,根据式(5)可知最大压力值对应时刻即为燃烧结束时刻,该时刻对应的燃烧厚度为 e_{\max} 。

3) 根据 $\psi - t$ 曲线,可以进一步得到 $d\psi/dt - t$ 曲线,而 $d\psi/dt - t$ 曲线反映了火药的燃烧速率与时间的变化关系

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{1}{V_1} \frac{dV}{dt} = \frac{S_1 e_1}{V_1} \sigma \frac{dZ}{dt} \quad (9)$$

其中

$$\frac{dZ}{dt} = \frac{1}{e_1} \frac{de}{dt} \quad (10)$$

式中: V_1 为药粒的原体积; S_1 为药粒的起始表面积; σ 为相对燃烧面积。

将式(8)代入式(9)化简得

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{S_1}{V_1} \sigma u_1 p^n \quad (11)$$

多孔火药具有两个不同的燃烧阶段,增面燃烧阶段和减面燃烧阶段,火药燃烧的分裂点即是其临界点。而在燃烧分裂点处, σ 从增函数突变为减函数,且下降迅速。因此,根据式(11)可得,在分裂点前,气体生成速率是增函数,在分裂点后,由于 σ 的突然下降,尽管 p^n 仍增加,但影响相对较小,气体生成速率出现明显下降, $d\psi/dt - t$ 曲线在分裂时刻出现极大值。因此,定义破碎发射药 $d\psi/dt - t$ 曲线的极大值点对应时刻为破碎发射药等效分裂的时刻,此时刻对应的燃烧厚度 e 就是破碎发射药等效肉厚的一半 e_1 ,燃烧结束时的相对燃烧厚度 $Z_k = e_{\max}/e_1$ 。

4) 联立步骤1)、2)所得的关系曲线,再根据 $Z = e/e_1$,建立 $\psi - Z$ 的关系曲线。

5) 根据 $\psi - Z$ 曲线和式(3),运用 origin8 的自定义拟合功能,采用分段拟合的方式,确定破碎发射药各等效形状特征量,得到破碎发射药的等效形状函数。

2 破碎发射药等效形状函数与起始动态活度比的关系

通过发射装药动态挤压破碎试验,得到3组不同挤压应力条件下不同破碎程度的发射药如图1~图3。再进行密闭爆发器试验得到每组破碎发射药的 $p - t$ 曲线,利用起始动态活度比理论计算得到对应的动态活度比如表1。运用本研究建立的求解破碎发射药等效形状函数的方法,得到3组破碎发射药对应的等效形状函数曲线如图4所示,等效形状特征量如表2所示。

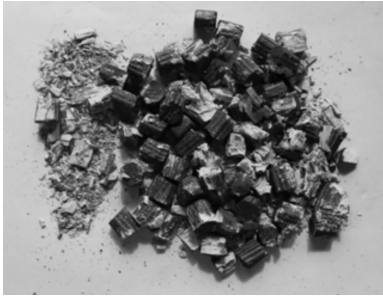


图1 第1发破碎发射药



图2 第2发破碎发射药



图3 第3发破碎发射药

表1 破碎发射药起始动态活度比

工况	1	2	3
R_0	2.503	1.993	1.359

表2 破碎发射药等效形状特征量

工况	a_1	a_2	a_3	e_1/mm
1	1.535 4	-1.543 1	0.795 4	0.61
2	1.276 0	-0.876 3	0.392 2	0.69
3	1.176 5	-0.645 7	0.336 1	0.80

z_k	b_0	b_1	b_2	b_3
2.139 2	-0.385 9	1.778 6	-0.729 8	0.093 5
2.123 3	-0.902 5	2.909 6	-1.481 4	0.251 0
1.784 7	-1.627 1	4.862 1	-3.001 4	0.617 7

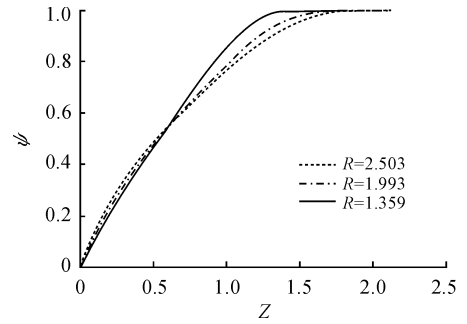


图4 破碎发射药等效形状函数曲线

从图4可见,起始动态活度比大的破碎发射药,前期曲线较陡,后期逐渐平缓。说明起始动态活度比大的发射药,在燃烧过程的前期放出的气体,导致膛内压力的迅速上升,产生安全隐患。起始动态活度比表征了破碎发射药的破碎程度,起始动态活度比大的发射药,其破碎程度大,相应的初始燃烧面积也大,导致前期的燃烧速度较快。同时,从表2可见,破碎程度大的发射药其等效分裂时刻提前,等效肉厚小,使燃烧后期已燃百分比增加比较缓慢。

3 结论

介绍了一种求解破碎发射药等效性状函数的方法。该方法可以确定不同破碎程度发射药的等效形状函数,为考虑破碎的两相流内弹道研究提供了新的研究方法,丰富了发射装药发射安全性理论体系。

参考文献:

- [1] 芮筱亭,王燕,王国平. 弹药发射安全性试验方法进展[J]. 兵工自动化,2012(12):81-84.
- [2] 芮筱亭,负来峰,王浩,等. 发射药床挤压破碎的试验模拟[J]. 兵工学报,2004,25(4):498-502.
- [3] 芮筱亭,冯宾宾,王燕,等. 发射装药发射安全性评定方法研究[J]. 兵工学报,2015,36(1):1-11.
- [4] 负来峰,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.
- [5] 王燕,芮筱亭,冯宾宾,等. 破碎发射药等效形状特征量的确定方法[J]. 弹道学报,2015(3):54-57.
- [6] 罗运军. 发射药燃烧控制技术的研究[J]. 燃烧科学与技术,1998(1):24-30.
- [7] 张邹邹,周敬,杨丽侠,等. 温度对粒状发射药动态力学性能的影响[J]. 火炸药学报,2015(2):86-88.
- [8] 应三九,肖正刚,徐复铭. 密闭爆发器实验中发射药燃烧全过程压力曲线的修正方法[J]. 火炸药学报,2007,30(4):62-64.
- [9] 冯宾宾,芮筱亭,负来峰,等. 破碎发射药形状特征量的计算方法[J]. 爆炸与冲击,2013,33(3):292-296.