

文章编号: 1006-9941(2007)05-0534-03

## 强动载荷下单基火药力学性能的研究

黄强, 郭东桥, 卞光荣, 耿广龙  
(徐州空军学院, 江苏 徐州 221000)

**摘要:** 实验模拟了单基火药与弹底的高速撞击, 运用泰勒理论计算了单基火药的动态屈服应力。结果显示: 单基药的动态屈服应力高于静态屈服应力。单基药的撞击速度在  $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  左右时, 药粒开始变形; 撞击速度达到  $190 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以上时, 药粒将被撞碎; 随贮存时间的增长, 单基药的力学性能变差。

**关键词:** 爆炸力学; 单基火药; 力学性能; 动载荷; 泰勒理论

**中图分类号:** TJ410.3+4; O389

**文献标识码:** A

### 1 引言

单基火药是常用枪炮发射药, 其力学性能的优劣直接关系到火炮射击过程中的安全。在火炮发射时, 药粒因受到点火冲量的强力作用, 以比较高的速度与弹底碰撞, 作用时间很短, 造成药粒几何形状突变, 出现裂纹, 甚至破裂, 使得火药燃烧表面陡然增大, 气体生成速率骤然增加, 造成压力急剧升高, 火药燃烧规律改变, 导致弹道反常。研究药粒与弹底碰撞过程, 就涉及到火药的动态力学性能。目前, 对火箭固体推进剂动态力学性能的研究比较深入<sup>[1-3]</sup>, 神经网络等一些新理论、新方法已用于动态力学性能的研究中<sup>[4]</sup>, 但关于枪炮发射药动态力学性能研究的文献不多。毋庸置疑, 研究火药的动态力学性能对于进一步了解火药在膛内的燃烧规律, 减少和避免弹道反常和膛炸事故具有重要意义。

本研究对药粒运动进行了简化处理, 认为药粒与弹底的碰撞为一维正碰, 并在此基础上应用 Taylor 理论研究火药的动态力学性能。

### 2 Taylor 理论简介

Taylor 理论<sup>[5]</sup>是专门研究平头柱形弹体对刚性靶元的纵向垂直撞击塑性变形的理论。

Taylor 假定:

(1) 弹体材料是理想弹塑性的, 靶体为完全刚性的, 撞击只会引起弹体变形;

(2) 整个过程是一维的, 不可压缩的, 忽略侧向运

动的惯性;

(3) 在柱形弹体中, 凡是撞击波未达到的部分, 都以同一速度作为一个刚性柱体向前运动。

Taylor 认为, 在撞击过程中, 当柱形弹体的一端(平头)垂直撞击平整的刚性靶元时, 弹体接触端的压力迅速增大, 立刻达到弹性极限, 同时有一个弹性压缩波以音速向弹体尾部的自由端传播。弹性波到达自由端后, 又反射回来, 反射的波是拉伸波, 此波仍以音速向接触端传送。在此过程中, 由于塑性区扩大的原因, 柱形弹体的弹性部分比原来弹体长度短了, 整个弹体以小于原来撞速的速度对弹塑性交接面进行新的撞击, 由此而产生的弹性波及其反射波以及弹塑性交接面逐渐向自由端移动, 撞击的速度也逐渐降低。从宏观上看, 这是一个弹性波往返传播, 分为若干个逐渐降低强度的撞击过程, 是不连续的, 其数学计算十分复杂。

Taylor 根据弹性波速度远大于塑性区的扩张速度, 弹性波往返一次所需的时间很短, 认为在此短时间内塑性区扩张速度的变化很小, 可以略去; 弹体撞击速度的变化也很小, 可近似看作不变。这样就把上述分段进行的过程, 近似看作为一个连续过程。在此基础上, 运用质量守恒和动量守恒方程, 导出了屈服应力的计算公式<sup>[5]</sup>:

$$\frac{\sigma_y}{\rho v_0^2} = \frac{L_0 - H}{2(L_0 - L_1)} \frac{1}{\ln\left(\frac{L_0}{H}\right)} \times 10^3 \quad (1)$$

式中,  $\sigma_y$  为动态屈服应力,  $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ ;  $\rho$  为弹体的密度,  $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $v_0$  为弹体撞击刚性靶的速度,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $L_0$  为弹体的原始长度,  $\text{mm}$ ;  $H$  为撞击后未变形部分的长度,  $\text{mm}$ ;  $L_1$  为弹体变形后的总长度,  $\text{mm}$ 。

Taylor 理论的重要性在于通过该理论可以从实验数据计算材料的动态屈服应力, 为研究弹塑性撞击提

收稿日期: 2006-10-09; 修回日期: 2007-05-08

作者简介: 黄强(1961-), 男, 副教授, 硕士, 研究方向为航空弹药研究与教学。e-mail: my163netmail@163.com

供了一种研究方法和理论依据。

然而,在实际应用中,由于难以准确判定弹性变形段和塑性变形段的过渡界面,利用式(1)算得的结果比较分散,存在较大的误差。为了使计算结果更接近实际,本文尝试采用动量法进行计算,公式<sup>[5]</sup>为:

$$\frac{\rho v_0^2}{8\sigma_y} = [-\ln(1 - A) - A] \times 10^{-3} \quad (2)$$

式中,  $A = \left[ 2 \left( 1 - \frac{L_1}{L_0} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$ , 其中各符号的含义均同式(1)。

### 3 实验部分

#### 3.1 实验

为了较真实地模拟药粒在膛内的运动过程,实验中用火帽作为发射源,利用起爆器起爆导爆管点火,使药粒以一定的速度垂直碰撞刚性靶板,实验装置组成如图 1 所示。

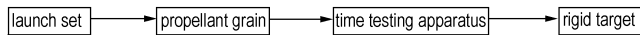


图 1 实验装置框图

Fig. 1 Frame map of experimental apparatus

实验所测的火药为 14/7 单基药,根据不同贮存年限取三个试样,试样 A 贮存了 22 年;试样 B 贮存了 17 年;试样 C 贮存了 12 年。

实验中,首先用砂纸打磨药粒的两端,使之趋于平面,而后用千分尺测量药粒撞击变形前、后的尺寸,用盛普 SP3165B3 电子测时仪测量药粒撞击靶板过程中的运动时间,并通过改变火帽装药量的方法改变药粒的撞击速度。实验温度为室温。把所测得的各项代入式(2),计算药粒的动态屈服应力。

#### 3.2 结果与分析

##### 3.2.1 动态屈服应力与撞击速度的关系

从 A、B、C 试样中任取 10 粒火药,测量药粒几何尺寸,用分析天平称量单个药粒的质量,计算火药平均密度,结果见表 1。表 1 中的  $D_0$ 、 $L_0$ 、 $W$ 、 $d_0$ 、 $\rho$  分别为药粒的直径、长度、质量、药粒小孔的直径和药粒的密度。

实验中,每个速度区间测试 5 粒火药,然后计算 5 粒火药的平均屈服应力,结果见表 2。根据表 2 绘制火药的  $\sigma_y \sim v_0$  曲线(见图 2)。

由表 2 可知,单基药的动态屈服应力基本在  $10^8$  量级,高于它的静态屈服应力 ( $10^7$  量级<sup>[6]</sup>)。这是因为处在动态下的药粒,当受到瞬间高频力的作用时,药粒的受力部分来不及在极短的时间内把应力分散开而

导致应力集中,而静态下的药粒所受的力是均匀施加的,不会产生应力集中,所以药粒的动态屈服应力高于它的静态屈服应力。

表 1 试样 A 的药粒尺寸

Table 1 Size of sample A

No.	$D_0$ /mm	$L_0$ /mm	$W$ /g	$d_0$ /mm	$\rho$ /g · cm <sup>-3</sup>
1	5.63	14.17	0.5060	0.51	1.52
2	5.63	14.96	0.5360	0.48	1.52
3	5.76	14.46	0.5185	0.53	1.46
4	5.62	13.88	0.4955	0.50	1.52
5	5.79	14.32	0.5311	0.55	1.50
6	5.67	13.81	0.5179	0.49	1.57
7	5.64	14.07	0.5091	0.56	1.56
8	5.70	14.90	0.5411	0.47	1.50
9	5.70	13.91	0.5081	0.56	1.54
10	5.65	13.79	0.5068	0.52	1.56
$\rho_{\text{average}} = 1.53$					

表 2 速度区间及区间内的平均速度和平均应力

Table 2 Speed extent and average speed, stress in the extent

sample	speed extent /m · s <sup>-1</sup>	average speed /m · s <sup>-1</sup>	average stress /(N/m <sup>2</sup> ) × 10 <sup>8</sup>
A	40-50	42.40	1.13
	50-60	55.30	1.91
	60-70	65.68	3.40
	70-80	76.02	3.04
B	40-50	40.9	1.82
	50-60	55.51	3.05
	60-70	64.69	3.74
	70-80	74.60	3.33
C	40-50	49.90	1.51
	50-60	57.09	2.75
	60-70	64.61	3.84
	70-80	73.00	3.19

Taylor 理论认为,对于不同材料,其动态屈服应力与撞击速度无关。然而本实验的结果表明,在一定范围内动态屈服应力随撞击速度的提高呈上升趋势,超过一定值后又呈下降趋势,如图 2 所示。产生这种现象的原因是研究对象的性质不同。Taylor 理论中研究的材料是完全弹塑性的,而本实验研究的火药则是一种近似刚性的材料。就火药而言,随着碰撞速度的提高,火药内部处于不规则状态的高分子的取向运动和链段间的滑移与冲击力之间的平衡,需要在更短的时间内完成,为了实现这一平衡,材料内部必须达到更高的弹性压缩极限,宏观上表现为随撞击速度的增大,动态屈服应力呈上升趋势。撞速继续增大后,处于不规则状态的高分子的取向运动和链段间的滑移与冲击力之间无法在极短的时间内达到平衡,药粒被破坏,此时应力值为最大。此后,尽管撞击速度继续增大,但由于药粒已破坏,动态屈服应力呈下降趋势,所以得出了图

2所示的结果。

图2表明,三种单基药在撞击速度为  $60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  之前,应力呈上升趋势;撞速为  $60 \sim 70 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,应力达到最大,超过  $70 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,应力开始下降。

由于采用 Taylor 理论,把火药看成近似完全弹塑性的材料,图2中上升段近似于直线。

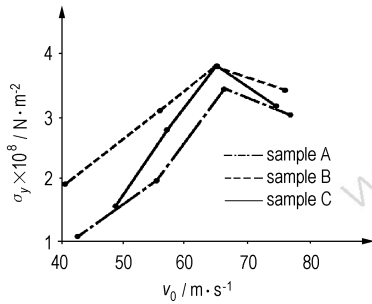


图2 火药的  $\sigma_y \sim v_0$  曲线

Fig. 2  $\sigma_y - v_0$  curves of the samples

### 3.2.2 撞击速度与破坏程度的关系

将上述三种试样各取5粒,测试药粒的撞击速度与其破坏程度间的关系(见表3)。

从表3可以看出,三种单基药的最大动态应力值和药粒破碎时的撞击速度各不相同,但量级接近,都是在撞击速度达到  $190 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时药粒才被撞碎。结果表明,随着火药贮存时间的增长,药粒撞碎时的撞速逐渐减小,最大应力值趋于降低,这意味着经过长时间贮存的火药力学性能下降了。

表3 撞击速度与药粒破坏程度间的关系

Table 3 Relationship between striking speed and broken extent

sample	$\sigma_{\max}$ / $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$	$V_d$ / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$\sigma_d$ / $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$	$V_b$ / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
A	$3.58 \times 10^8$	42.40	$1.13 \times 10^8$	192.4
B	$3.74 \times 10^8$	40.90	$1.82 \times 10^8$	195.8
C	$3.84 \times 10^8$	49.90	$1.51 \times 10^8$	212.3

Note:  $\sigma_{\max}$ , maximum stress;  $V_d$ , striking speed at the beginning of deformation;  $\sigma_d$ , stress at beginning of deformation;  $V_b$ , striking speed as the grain was broken.

## Mechanical Properties of Single Base Propellant Under Strong Dynamic Load

HUANG Qiang, GUO Dong-qiao, BIAN Guang-rong, GENG Guang-long

(Xuzhou Air Force Institute, Xuzhou 221000, China)

**Abstract:** The striking of single base propellant (SBP) grain on bullet bottom at high speed was simulated by experiment. The dynamic yielding stress (DYS) of SBP was calculated by using Taylor theory. The results show that the DHS is larger than the static yielding stress to SBP. The shape of SBP begins to change when striking speed of SBP is at  $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . When striking speed of SBP is over  $190 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , the grain will be broken. With the storage time prolonged, mechanical property of SBP tends to be bad.

**Key words:** explosion mechanics; single base propellant; mechanical property; dynamic load; Taylor theory

## 4 结论

- (1) 单基药的动态屈服应力高于其静态屈服应力。
- (2) 当撞击速度小于  $60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时,随药粒撞击速度加快,火药动态屈服应力增大。
- (3) 随着单基药贮存时间的增长,它的动态屈服应力减小,力学性能变差。
- (4) 单基药的撞击速度在  $40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  左右时,药粒开始变形;撞击速度达到  $190 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  以上时,药粒将被撞碎。

### 参考文献:

- [1] 范夕萍,刘子如,孙莉霞,等. NEPE-5 固体推进剂物理老化的动态力学性能[J]. 含能材料,2002,10(3): 132-134.  
FAN Xi-ping, LIU Zi-ru, SUN Li-xia, et al. Dynamic properties of aged NEPE-5[J]. *Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao)*, 2002,10(3): 132-134.
- [2] 司馥铭. 聚氧化乙烯粘合剂推进剂力学性能研究[J]. 固体火箭技术,2004,27(1): 53-56.  
SI Fu-ming. Study on mechanical properties of PEO binder propellants [J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2004,27(1): 53-56.
- [3] 王宁飞,魏卫. 固体推进剂高过载冲击动态力学性能研究[J]. 火炸药学报,2002,19(1): 19-21.  
WANG Ning-fei, WEI Wei. Research status for dynamic mechanical properties of solid propellants under high-overloads [J]. *Chinese Journal of Explosives & Propellants*, 2002,19(1): 19-21.
- [4] Zhang Z L, Klein P, Friedrich K. Dynamic mechanical properties of PTFE based short carbon fibre reinforced composites: Experiment and artificial neural network prediction [J]. *Composites Science and Technology*, 2002, 62: 1001-1009.
- [5] 钱伟长. 柱形弹体撞击塑性变形的 G. I 泰勒理论的分析及其改进[J]. 应用数学和力学,1982,3(6): 743-756.  
QIAN Wei-chang. The analytical solution of G. I Taylor's theory of plastic deformation in impact of cylindrical projectiles and its improvement [J]. *Applied Mathematics Mechanics*, 1982,3(6): 743-756.
- [6] 范夕萍,刘子如,孙莉霞,等. 含能粘弹体的动态力学性能与极限力学性能的关系研究[J]. 盐湖研究,2003,11(2): 56-59.  
FAN Xi-ping, LIU Zi-ru, SUN Li-xia, et al. Investigation on the relationship of the dynamic mechanical and ultimate properties for energetic materials [J]. *Journal of Salt Lake Research*, 2003,11(2): 56-59.