

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2014.06.006

一种圆筒试验不同数据处理新方法^{*}

王 辉 沈 飞 袁建飞

西安近代化学研究所(陕西西安,710065)

[摘 要] 对标准圆筒试验的两种数据处理方法进行了系统阐述和研究,并以一种 PBX 炸药(HMX/黏结剂:95/5)的 Ø50 mm 圆筒试验为例,分别采用两种数据处理方法得到试验圆筒的壁膨胀速度、比动能、格尼系数等参量,详细分析和对比了圆筒壁膨胀速度与位移曲线、膨胀比动能与位移曲线。结果表明,在圆筒膨胀早期,新处理方法比传统处理方法能更准确地描述圆筒壁膨胀速度的变化过程,而在膨胀的中后期,两种处理方法所得圆筒壁速曲线偏差较小,且所获得的格尼系数相差很小。

[关键词] 圆筒试验;爆轰;数据处理方法;格尼系数;做功能力

[分类号] TQ56;O389

引言

圆筒试验是专门用于评估炸药作功能力及确定爆轰产物 JWL 状态方程的标准化试验,在国内外都得到了广泛的应用,采用的试验方法也基本相同。主要采用电离探针测量炸药爆速,通过高速扫描相机测量炸药稳定爆轰段圆筒径向膨胀距离随时间的变化,并利用特定的经验公式对试验数据进行拟合,然后进一步计算出圆筒壁的膨胀速度、比动能及格尼系数等参量,用于评价炸药对金属的作功能力。

目前国内研究人员大多按照国军标《标准圆筒试验法》(GJB772A—1997)开展圆筒试验研究^[1-4],其中采用的数据处理方法所使用的拟合公式完全由经验给出,一般是直接对试验曲线进行几何修正,缺乏一定的理论根据,且导出的速度曲线在膨胀早期及膨胀后期会表现出一些异常现象^[5],所以一些文献中提出了一类新的数据处理方法^[5-10],以提高所获数据的精度,从而更全面、准确地描述圆筒壁的膨胀特征。本文针对这两类数据处理方法进行系统地讨论,并以一种 PBX 炸药(HMX/黏结剂:95/5)的 Ø50 mm 圆筒试验为例进行对比。

1 试验数据分析方法

1.1 经典数据分析方法

在圆筒试验中,高速相机狭缝扫描记录的是圆筒壁外表面的径向膨胀过程,通过对试验底片的处理,获得圆筒壁的径向膨胀位移与时间数据,传统方法一般是对其直接进行拟合,然后通过位移变化的表达式进行求导,得出相应的膨胀速度表达式。

常用的拟合公式有:

$$t = \alpha + \beta(r_e - r_{e0}) + \eta \cdot \exp[\delta(r_e - r_{e0})]; \quad (1)$$

$$t = A_0 + \sum_{i=1}^4 A_i (r_e - r_{e0})^i. \quad (2)$$

式中: r_e 、 r_{e0} 分别为圆筒壁外表面的半径及初始半径; t 为相应的膨胀时间; α 、 β 、 η 、 δ 、 A_0 、 A_i 均为拟合参数。

目前,国军标《标准圆筒试验法》数据处理采用的是式(1)。

将式(1)的两侧对时间求导,得到圆筒壁外表面的径向速度为:

$$u_e = \frac{dr_e}{dt} = \frac{1}{\beta + \eta\delta \cdot \exp[\delta(r_e - r_{e0})]}. \quad (3)$$

同理,由式(2)得到的圆筒壁外表面的径向速度为:

$$u_e = \frac{dr_e}{dt} = \left[\sum_{i=1}^4 A_i \cdot i \cdot (r_e - r_{e0})^{i-1} \right]^{-1}. \quad (4)$$

对于圆筒壁的比动能,则可根据式(5)计算:

$$e = \frac{1}{2} u_e^2. \quad (5)$$

对于炸药格尼系数的计算,一般认为爆轰产物的相对比容 $V=7$ 时(如在 Ø 50 mm 圆筒试验中,此时 $r_e - r_{e0} \approx 38$ mm),爆轰产物已接近最大膨胀状态,即圆筒壁的膨胀速度几乎不再增加^[8],则炸药的格尼系数为:

$$\sqrt{2E_g} = \sqrt{\frac{M}{m} + \frac{1}{2}} \cdot u_e|_{V=7}. \quad (6)$$

* 收稿日期:2014-01-10

基金项目:总装基础预研基金项目

作者简介:王辉(1977~),男,高级工程师,从事含能材料爆轰性能及实验研究。E-mail: land_wind@163.com

式中: M 为单位长度圆筒的质量; m 为单位长度炸药的质量。

1.2 新数据分析方法

目前,一些文献^[5-10]开始采用一类新的数据处理方法,其主要假定爆轰产物压力及圆筒壁径向加速度呈指数形式降低:

$$\frac{d^2 r_m}{dt^2} = \sum_{j=1}^n a_j b_j e^{-b_j t} \quad (7)$$

式中: r_m 为圆筒质量中心面半径; a_j 和 b_j 均为拟合参数。同时假定圆筒横截面的面积在圆筒膨胀过程中保持不变,则 r_m 与圆筒壁外表面半径 r_e 、内表面半径 r_i (r_{i0} 为其初始值) 之间满足如下关系:

$$r_e^2 - r_m^2 = r_m^2 - r_i^2 = (r_{e0}^2 - r_{i0}^2)/2 \quad (8)$$

根据初始条件,即中心面开始运动时其对应的径向速度和径向位移值均为 0,可得出中心面处的径向壁速度 u_m 和径向壁位移 Δr_m 的解析表达式:

$$u_m = \frac{dr_m}{dt} = \sum_{j=1}^n a_j [1 - e^{-b_j(t+t_0)}]; \quad (9)$$

$$\Delta r_m = r_m - r_{m0}$$

$$= \sum_{j=1}^n a_j \left\{ (t+t_0) - \frac{1}{b_j} [1 - e^{-b_j(t+t_0)}] \right\} \quad (10)$$

式中: t_0 作为时间项的修正参数,它也是拟合参数。

由于试验得到的是圆筒壁外表面的径向膨胀位移 $(r_e - r_{e0}) \sim t$ 数据,需要通过式(8)对数据进行处理,将其转换为圆筒壁质量中心面处的数据 $(r_m - r_{m0}) \sim t$,然后将其代入式(10)进行拟合。此外, n 值一般取 1 或 2。

对于比动能的计算,需要采用圆筒质量中心面的质点速度,即

$$e = \frac{1}{2} u_s^2 \quad (11)$$

式中: u_s 为圆筒质量中心面的质点速度,可根据式(12)求出^[5,7]:

$$u_s = 2D \cdot \sin[\arctan(u_m/D)/2] \quad (12)$$

式中: D 为炸药在圆筒内的爆速。

此时,格尼系数的计算公式也变为:

$$\sqrt{2E_g} = \sqrt{\frac{M}{m} + \frac{1}{2}} \cdot u_s|_{V=70} \quad (13)$$

2 两类方法的应用及分析

这里以一种 PBX 炸药的 $\varnothing 50$ mm 圆筒试验为例,采用上述两类数据处理方法进行分析。

2.1 圆筒试验及数据拟合

试验样品的尺寸为 $\varnothing 50$ mm \times 495 mm,密度为 1.826 g/cm³;采用 TU1 无氧铜(密度 8.93 g/cm³)作为圆筒材料,圆筒内外径分别为 50.0 mm 和 60.2

mm。狭缝扫描位置距末端 200 mm,高速扫描相机的扫描速度为 1.5 km/s,采用电探针法测量炸药在圆筒中的爆速,试验得到的底片见图 1。

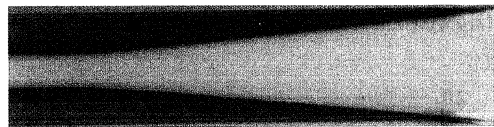


图 1 圆筒壁膨胀的底片

Fig. 1 Photograph of the cylinder wall expansion process

试验测得炸药的平均爆速为 8 660 km/s,通过对试验底片(图 1)进行数字化判读,可获得圆筒壁膨胀过程的相关数据,对数据分别采用式(1)和式(2)拟合,其参数见表 1 和表 2。

表 1 公式(1)对位移曲线拟合的参数

Tab. 1 Curve-fitting parameters by Eq. (1)

$\alpha/$ μs	$\beta/$ ($\mu s \cdot mm^{-1}$)	$\eta/$ μs	$\delta/$ (mm^{-1})
3.1 069	0.5 624	-3.0 148	-0.1 361

表 2 公式(2)对位移曲线拟合的参数

Tab. 2 Curve-fitting parameters by Eq. (2)

$A_0/$ μs	$A_1/$ ($\mu s \cdot mm^{-1}$)	$A_2/$ ($\mu s \cdot mm^{-2}$)	$A_3 \times 10^4/$ ($\mu s \cdot mm^{-3}$)	$A_4 \times 10^6/$ ($\mu s \cdot mm^{-4}$)
0.2 520	0.8 721	-0.0 128	2.3 388	-1.5 600

利用式(8)将判读结果转换成圆筒质量中心面处的数据,然后采用式(10)进行拟合,其拟合参数列于表 3。

表 3 公式(10)对位移曲线拟合的参数

Tab. 3 Curve-fitting parameters by Eq. (10)

n	$a_1/$ ($mm \cdot \mu s^{-1}$)	$b_1/$ (μs^{-1})	$a_2/$ ($mm \cdot \mu s^{-1}$)	$b_2/$ (μs^{-1})	$t_0/$ μs
1	1.7 946	0.2 351	-	-	1.7 415
2	1.0 861	0.7 219	0.7 371	0.1 351	0.8 197

2.2 速度变化曲线的比较

为了便于比较不同拟合方法所获得的速度变化曲线,先将式(9)描述的圆筒中心面径向速度随时间的变化曲线转换为圆筒外表面的径向速度和径向位移的关系曲线,然后与式(3)和式(4)描述的曲线进行对比,如图 2 所示。从图中可以看出,4 种拟合公式所获得的速度变化曲线在圆筒膨胀早期差异较大,这跟拟合公式本身的特征有关,如,由式(1)拟合获得的速度曲线在初始时刻的值为 $1/\beta$,由式(2)拟合获得的速度曲线在初始时刻的值为 $1/A_1$;在圆筒膨胀中期,这 4 条曲线差异不大;而在圆筒膨胀的后期,由式(2)拟合获得的速度曲线越来越高,明显

偏离实际效果。由表 4 列出 4 条速度曲线在圆筒壁膨胀特征位移处的速度值可以看出,当圆筒壁膨胀位移为 38 mm 时,4 条速度曲线的速度值整体差异不大,由式(1)和式(10) ($n=2$) 拟合得到的结果最为接近。

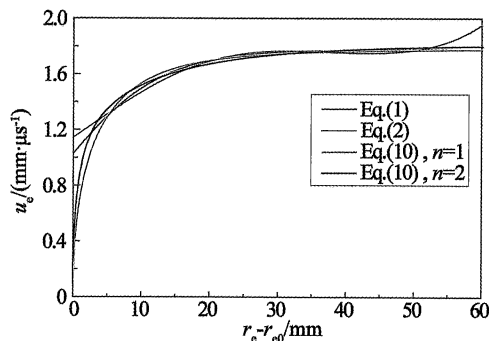


图 2 圆筒壁径向速度与位移曲线

Fig. 2 Curves of $u_e \sim (r_e - r_{e0})$ of the cylinder test

表 4 圆筒壁特征位移处的膨胀速度值

Tab. 4 Cylinder expansion velocity of cylindrical wall at the given distance

(mm · μs ⁻¹)				
$r_e - r_{e0}/\text{mm}$	12	25	38	50
公式(1)	1.557	1.736	1.771	1.776
公式(2)	1.528	1.748	1.759	1.773
公式(10) ($n=2$)	1.566	1.717	1.772	1.794
公式(10) ($n=1$)	1.593	1.732	1.764	1.774

2.3 比动能及格尼系数的比较

在比动能的计算过程中,式(1)和式(2)拟合获得的圆筒外表面径向速度 u_e 可直接代入式(5),而式(10)拟合获得圆筒中心面径向速度 u_m 需要转变为圆筒质量中心面的质点速度 u_s ,然后才能代入式(11)进行计算。炸药格尼系数的计算过程与此类似。图 3 描述了圆筒膨胀的比动能随位移的变化曲线,这 4 条曲线的变化趋势类似于图 2,由于比动能与圆筒膨胀速度的平方成正比,所以在圆筒膨胀的早期和中期,描述比动能变化的 4 条曲线之间的差异较图 2 更为显著;而膨胀位移超过 30 mm 后,除了式(2)拟合得到的曲线仍有较大波动,其余 3 条曲线的差异逐渐减小,尤其是由式(1)和式(10) ($n=2$) 拟合得到的曲线差异最小。此外,表 5 列出了采用不同数据处理方法所获得的格尼系数。其中,若采用式(1)和式(2)拟合试验数据,则将圆筒外表面径向速度 u_e 代入式(6);若采用式(10)拟合试验数据,则将圆筒质量中心面的质点速度 u_s 代入式(13)。从表 5 中可以看出,当爆轰产物的相对比容 $V=7$ 时,4 种拟合公式计算所得圆筒外表面径向速

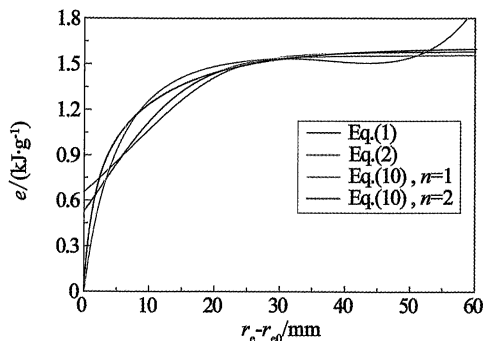


图 3 圆筒膨胀的比动能与位移曲线

Fig. 3 Curves of $e \sim (r_e - r_{e0})$ of the cylinder test

表 5 不同数据处理方法所获格尼系数

Tab. 5 Gurney coefficients by different data processing methods

(mm · μs ⁻¹)			
拟合公式	$u_e _{V=7}$	$u_s _{V=7}$	$\sqrt{2E_g}$
公式(1)	1.771	—	2.909
公式(2)	1.759	—	2.890
公式(10) ($n=1$)	—	1.763	2.896
公式(10) ($n=2$)	—	1.771	2.909

度 u_e 或圆筒质量中心面的质点速度 u_s 值整体相差不大,处于 1.76 ~ 1.77 mm/μs 之间,使得所获格尼系数值之间的差异也较小,所得结果均在 2.89 ~ 2.91 mm/μs 之间,且由式(1)和式(10) ($n=2$) 获得的结果甚至达到一致。

3 结论

通过对比圆筒试验两类数据处理方法所得结果发现:

1) 采用传统处理方法获得的数据不能较好描述膨胀初期的驱动过程,但在膨胀的中后期,两种处理方法所得径向壁速曲线偏差较小;

2) 计算圆筒膨胀过程的比动能及炸药的格尼系数时,传统处理方法采用筒壁外表面的径向速度,而新处理方法采用质量中心面的质点速度。在圆筒膨胀的早期和中期,两种方法所获比动能偏差明显,但膨胀后期偏差较小。此外,两种方法所获取的格尼系数相差很小。

参 考 文 献

- [1] 宋锦泉,汪旭光,李三红. 乳化炸药圆筒试验研究[J]. 爆破器材, 2007, 36(2): 1-5.
Song Jinquan, Wang Xuguang, Li Sanhong. Study on cylinder test for emulsion explosives[J]. Explosive Materials, 2007, 36(2): 1-5.
- [2] 谭凯元,韩勇,罗观,等. HMX 基 PBX 的做功能力及其 JWLL 状态方程[J]. 火炸药学报, 2013, 36(3): 42-45.

- Tan Kaiyuan, Han Yong, Luo Guan, et al. Power ability and JWL equation of state of a HMX-based PBX [J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2013, 36 (3): 42-45.
- [3] 董海山, 周芬芬. 高能炸药及相关物性能[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 145-167.
- [4] 孙承伟, 卫玉章, 周之奎. 应用爆轰物理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000: 286-296.
- [5] 孙占峰, 李庆忠, 孙学林, 等. 标准圆筒试验技术与数据处理方法研究[J]. 高压物理学报, 2008, 22 (2): 160-166.
- Sun Zhanfeng, Li Qingzhong, Sun Xuelin, et al. Study on standard cylinder test technology and data processing method[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2008, 22(2): 160-166.
- [6] Muhamed S. Test methods for explosives [M]. New York: Springer-Verlag, 1995: 188-200.
- [7] Hornberg H, Volk F. The cylinder test in the context of physical detonation measurement methods [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 1989, 14 (5): 199-211.
- [8] Lan I F, Hung S C, Chen C Y, et al. An improved simple method of deducing JWL parameters from cylinder expansion test [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 1993, 18(1): 18-24.
- [9] Souers P C, Lauderbach L, Garza R, et al. Upgraded analytical model of the cylinder test [J]. Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 2013, 38(3): 419-424.
- [10] 沈飞, 王辉, 袁建飞, 等. RDX 基含铝炸药不同尺寸的圆筒试验及数值模拟[J]. 含能材料, 2013, 21 (6): 777-780.
- Shen Fei, Wang Hui, Yuan Jianfei, et al. Different diameter cylinder tests and numerical simulation of RDX based aluminized explosive [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2013, 21(6): 777-780.

A New Method of Different Data Processing for the Cylinder Test

WANG Hui, SHEN Fei, YUAN Jianfei

Xi'an Modern Chemistry Research Institute (Shaanxi Xi'an, 710065)

[ABSTRACT] Two data processing methods for standard cylinder tests were described and studied systematically with which the 50 mm cylinder test of a PBX explosive was made as an example. The cylinder test data were obtained in terms of the parameters of radial wall expansion velocity and Gurney coefficient by these two methods. Moreover, the expansion velocity-expansion displacement curve and the ratio energy-expansion displacement curve of cylinder by the two methods were analyzed and compared. The results show that the new processing method can more accurately describe the expansion course of the cylindrical wall than the conventional method at the early expansion stage. While at the middle and latter expansion stage the curves generated from the two methods turn to be close to each other, and the difference for the obtained Gurney coefficient is minor.

[KEY WORDS] cylinder test; detonation; data processing methods; Gurney coefficient; power capability

(上接第 25 页)

Coating of RDX and Its Application in CMDB Propellant

YANG Xueqin^{①②}, CHANG Shuangjun^①, ZHAO Lukui^②, LIU Aizhuan^②, GAO Yumeng^②

①North University of China (Shanxi Taiyuan, 030008)

②Shanxi Beifang Xing'an Chemical Industrial Co., Ltd. (Shanxi Taiyuan, 030008)

[ABSTRACT] RDX was surface coated and modified with bonding agent LBA-1 and thermoplastic elastomer (TPE), and then was applied in the CMDB propellant. Scanning Electron Microscopy (SEM) was used to characterize the particle surface of RDX before and after coating. The friction and impact sensitivities of the RDX before and after coating and RDX-CMDB propellant were studied. Furthermore, the combustion and mechanical properties of the RDX-CMDB propellant were characterized. The results show that, compared with the uncoated RDX, the friction sensitivity of the coated RDX with bonding agent and corresponding RDX-CMDB reduce by 68% and 37.5%, respectively. What's more, surface coated RDX had a significant effect on the mechanical properties of the propellant. For example, the tensile strength and elongation of the RDX-CMDB were increased by 4.72 MPa and 19.67%, respectively, after coating of RDX with thermoplastic elastomer; and RDX coated with these two materials also exhibited a certain effect on the combustion properties of the propellant.

[KEY WORDS] RDX; CMDB; bonding agent; thermoplastic elastomer; mechanical sensitivity