文章编号：1000-5773(2013)04-0582-05

钝感高能炸药 JB-9014 做功能力的实验研究*

徐 辉[1]，孙占峰[2]

(1.绵阳师范学院数学与计算机科学学院，四川绵阳 621000；
2.中国工程物理研究院流体物理研究所，四川绵阳 621900)

摘要：采用狭缝扫描和激光干涉联合测试的改进标准圆筒试验技术，对比研究了 JB-9014(钝感高能炸药)和 JOB-9003(高能炸药)两种炸药的做功能力，获得了相同膨胀时间和相同径向位移条件下的比动能。研究结果表明：JB-9014 炸药的做功能力明显低于 JOB-9003 炸药，膨胀速度相对稳定后，相同膨胀时间条件下 JB-9014 炸药的做功能力基本相当于 JOB-9003 炸药的 68.56%，相同径向位移条件下 JB-9014 炸药的做功能力基本相当于 JOB-9003 炸药的 69.39%；而且，随着时间的发展或径向位移的增加，两种炸药的做功能力之比有逐渐增大的趋势，与 JB-9014 炸药的化学反应区较宽且 CJ 面后仍有可观放能的性质相吻合。

关键词：钝感高能炸药；圆筒试验；做功能力
中图分类号：O384 **文献标识码**：A

1 引 言

以 TATB 为主的钝感高能炸药(Insensitive High Explosive，IHE)与高能炸药(High Explosive，HE)相比，爆轰做功能力有所降低，但因其具有突出的安全性能，在先进武器设计中表现出越来越重要的应用价值。由于钝感高能炸药具有爆轰化学反应区较宽、CJ 面后仍有可观放能等非理想爆轰特性，因此对其爆轰性能的研究一直是国际爆轰学术领域的“热点”之一。JB-9014 炸药是我国研制的与美国 PBX-9502 炸药基本相当的一种钝感高能炸药，定量评估其爆轰做功能力，对于钝感高能炸药的成功应用和武器设计具有重要意义。

圆筒试验是评估炸药做功能力、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应用[1-9]。20 世纪末，于川等人[2]采用圆筒试验法，研究了钝感高能炸药 JB-9014 爆轰产物的 JWL 状态方程，但是受实验条件、底片判读方法和数据处理方法等限制，实验数据精度不高。本研究采用改进的标准圆筒试验技术[10-12]，对 JB-9014(IHE)和 JOB-9003(以 HMX 炸药为主的 HE)两种炸药的做功能力进行深入的对比研究，为武器设计及性能研究奠定基础。

2 实验原理及方法

针对 JB-9014 和 JOB-9003 两种炸药，进行∅25 mm 圆筒试验。炸药尺寸为∅25 mm×300 mm；圆筒内径为 25 mm，壁厚 2.5 mm，材料为紫铜。实验布局见图 1，采用狭缝扫描和 VISAR(Velocity Interferometer System for Any Reflector)联合测试的改进圆筒试验技术[10]。狭缝扫描直接记录固定空间位置处圆筒壁的径向位移-时间关系，然后通过数据处理和修正计算，得到质点的速度、位移及其相应的径向和轴向分量。狭缝扫描采用平行光后照明技术，扫描位置距起爆端 200 mm，相机转速为

* **收稿日期**：2013-03-20；**修回日期**：2013-06-15
作者简介：徐 辉(1978－)，女，硕士，讲师，主要从事计算力学和实验力学研究. E-mail：xuhui714@sina.com
通讯作者：孙占峰(1976－)，男，博士，副研究员，主要从事冲击波与爆轰物理研究. E-mail：sunzf7695@163.com

60 kr/min,扫描速度为 3 km/s。VISAR 直接测量固定空间位置处圆筒壁的径向速度-时间关系,进而计算径向位移-时间关系。VISAR 光路与狭缝扫描光路以及圆筒轴线垂直,光纤探头前端距装置外表面 75 mm;测试位置与狭缝扫描位置对应,距起爆端 200 mm;采用双灵敏度,条纹常数为 316 m/(s·Fr)和 392 m/(s·Fr)。

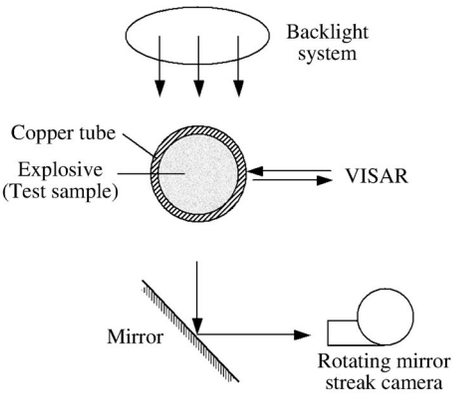
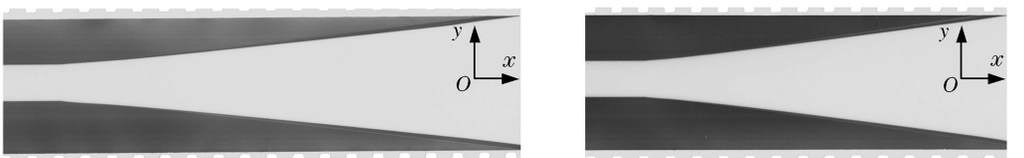


图 1　圆筒试验布局图

Fig. 1　Layout of cylinder test

3　实验结果和讨论

在 JB-9014 和 JOB-9003 两种炸药圆筒试验中,狭缝扫描照相得到的底片如图 2 所示。底片的 x 方向包含时间信息,y 方向包含圆筒外表面的径向位移信息。



(a) JB-9014　　(b) JOB-9003

图 2　圆筒试验底片

Fig. 2　Negatives from cylinder tests

对狭缝扫描照相得到的底片,采用文献[10]的底片信息数字化方法以及圆筒膨胀过程中的横截面不变假定,得到圆筒壁质量中心面处的径向位移-时间($r_{\mathrm{m},j}$,t_j)数据,然后按(1)式进行非线性最小平方拟合,即

$$\Delta r_{\mathrm{m}} = r_{\mathrm{m}} - r_{\mathrm{m},0} = f(t) = \sum_{j=1}^{n} a_j \{ b_j t_{\mathrm{i}} - [1 - \exp(-b_j t_{\mathrm{i}})] \} \tag{1}$$

式中:r_{m} 和 $r_{\mathrm{m},0}$ 分别为圆筒壁质量中心面的半径和初始半径;$t_{\mathrm{i}} = t + t_0$,为圆筒壁质量中心面的运动时间,而实验直接测量的 t 是圆筒外表面的运动时间;a_j、b_j($j = 1, 2, \cdots, n$)、t_0 为拟合参数。$n = 2$ 时的拟合参数结果见表 1。

表 1　圆筒膨胀曲线拟合参数

Table 1　Curve fitting parameters of the cylinder expansion

Explosive	a_1/(mm)	a_2/(mm)	b_1^{-1}/(μs)	b_2^{-1}/(μs)	t_0/(μs)
JB-9014	3.581 6	0.928 54	0.189 47	0.928 83	1.161 44
JOB-9003	3.322 5	1.069 09	0.217 91	1.064 64	0.798 63

中心面处的径向速度 u_{r} 可表示为

$$u_{\mathrm{r}} = \frac{\mathrm{d}r_{\mathrm{m}}}{\mathrm{d}t} = \sum_{j=1}^{n} a_j b_j [1 - \exp(-b_j t_{\mathrm{i}})] \tag{2}$$

修正后得到的质点速度为

$$u_{\mathrm{s}} = \sqrt{u_{\mathrm{s,r}}^2 + u_{\mathrm{s,a}}^2} \tag{3}$$

式中:$u_{\mathrm{s,r}}$ 和 $u_{\mathrm{s,a}}$ 分别为质点速度的径向分量和轴向分量。$u_{\mathrm{s,r}}$ 和 $u_{\mathrm{s,a}}$ 的计算公式为[10]

$$u_{\mathrm{s,r}} = \frac{\mathrm{d}r_{\mathrm{m}}}{\mathrm{d}t} \cos\theta = D \sin\theta \tag{4}$$

$$u_{\mathrm{s,a}} = D(1 - \cos\theta) \tag{5}$$

式中：D 为爆速，θ 为膨胀角。由 $\frac{\mathrm{d}r_\mathrm{m}}{\mathrm{d}t}=u_\mathrm{r}=D\tan\theta$，可得

$$\tan\theta=\frac{u_\mathrm{r}}{D} \tag{6}$$

比动能的计算公式为

$$E=\frac{1}{2}u_\mathrm{s}^2 \tag{7}$$

按上述方法处理狭缝扫描实验结果，得到圆筒壁膨胀速度和位移曲线，将其与 VISAR 测试结果进行比较，如图 3 和图 4 所示。由图可见，对于两种不同炸药，两种测试方法得到的速度曲线和位移曲线都符合得较好，实验数据精度较高。其中，两种测试方法得到的位移-时间曲线基本重合，但速度-时间曲线表现出不同的特征：VISAR 测试得到的速度-时间曲线，体现了加载初期由于应力波在圆筒壁内来回反射导致的速度波动上升细节，测试精度更高；而狭缝扫描测试得到的速度-时间曲线是一种平均效果，记录时间更长，因此更利于长程做功能力的评估。

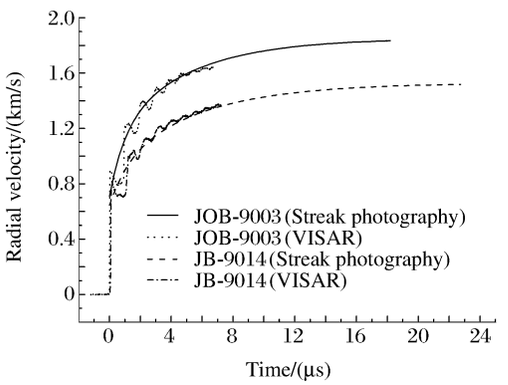


图 3 狭缝扫描和 VISAR 得到的径向速度比较

Fig. 3 Comparison of radial velocities from streak photography and VISAR

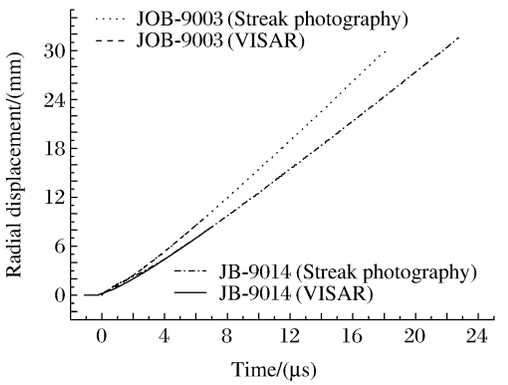


图 4 狭缝扫描和 VISAR 得到的径向位移比较

Fig. 4 Comparison of radial displacements from streak photography and VISAR

根据狭缝扫描实验，得到两种炸药在相同膨胀时间和相同径向位移条件下的做功能力，如表 2 和表 3 所示。

表 2 相同膨胀时间下两种炸药的做功能力比较

Table 2 Comparison of driving ability for two explosives at the same expanding time

t	JB-9014			JOB-9003			$\frac{E_{\text{JB-9014}}}{E_{\text{JOB-9003}}}$/(%)
/(μs)	Δr_m/(mm)	u_s/(km/s)	E/(kJ/g)	Δr_m/(mm)	u_s/(km/s)	E/(kJ/g)	
2.0	2.379	1.114	0.620	2.680	1.394	0.971	63.85
4.0	4.799	1.266	0.801	5.719	1.576	1.241	64.51
6.0	7.449	1.349	0.910	9.025	1.667	1.389	65.51
8.0	10.240	1.403	0.985	12.482	1.723	1.484	66.36
10.0	13.123	1.440	1.036	16.034	1.758	1.546	67.05
12.0	16.068	1.464	1.072	19.646	1.781	1.586	67.60
14.0	19.057	1.481	1.097	23.299	1.796	1.613	68.04
16.0	22.075	1.493	1.115	26.976	1.805	1.630	68.38
18.0	25.114	1.501	1.126	30.671	1.812	1.641	68.64
20.0	28.166	1.506	1.135	34.375	1.816	1.648	68.83

表 3　相同径向位移下两种炸药的做功能力比较

Table 3　Comparison of driving ability for two explosives at the same radial displacement

Δr_m /(mm)	JB-9014			JOB-9003			$\frac{E_{JB\text{-}9014}}{E_{JOB\text{-}9003}}$/(%)
	t/(μs)	u_s/(km/s)	E/(kJ/g)	t/(μs)	u_s/(km/s)	E/(kJ/g)	
3	2.545	1.167	0.681	2.207	1.421	1.010	67.41
5	4.209	1.276	0.815	3.542	1.546	1.195	68.15
7	5.745	1.341	0.899	4.787	1.618	1.308	68.68
9	7.121	1.382	0.955	5.962	1.666	1.387	68.86
11	8.559	1.415	1.001	7.114	1.701	1.447	69.18
15	11.282	1.457	1.061	9.404	1.749	1.530	69.35
19	13.942	1.481	1.097	11.665	1.778	1.581	69.39
23	16.615	1.496	1.119	13.857	1.795	1.611	69.44
27	18.679	1.503	1.130	15.984	1.805	1.630	69.31
30	20.604	1.508	1.137	17.622	1.811	1.639	69.33

由表 2 和表 3 可见:随着时间的发展或径向位移的增加,两种炸药的做功能力(即比动能)之比有逐渐增大的趋势,与 JB-9014 炸药的化学反应区较宽且 CJ 面后仍有可观放能的性质相吻合;在相同膨胀时间情况下,JB-9014 炸药驱动圆筒的膨胀量偏小,而在相同径向位移情况下,JB-9014 炸药驱动圆筒的膨胀时间偏长,所以表 3 中得到的两种炸药做功能力之比略大于表 2 中;膨胀速度相对稳定后,两种炸药在相同膨胀时间条件下的做功能力比($E_{JB\text{-}9014}/E_{JOB\text{-}9003}$)为 68.56%(膨胀时间在 15.0～20.0 μs 范围的比动能比平均值),在相同径向位移条件下的做功能力比为 69.39%(径向位移在 20～30 mm 范围的比动能比平均值)。

4　结　论

采用狭缝扫描和 VISAR 联合测试的改进标准圆筒试验技术,对钝感高能炸药 JB-9014 的做功能力进行了深入的实验研究,并与武器中常用的高能炸药 JOB-9003 进行了对比分析,给出了二者在相同膨胀时间和相同径向位移条件下的比动能。研究结果表明:JB-9014 炸药的做功能力明显低于 JOB-9003 炸药,膨胀速度相对稳定后,在相同膨胀时间条件下 JB-9014 炸药与 JOB-9003 炸药的做功能力比为 68.56%,在相同径向位移条件下的做功能力比为 69.39%;而且,随着时间的发展或径向位移的增加,两种炸药的做功能力(即比动能)之比有逐渐增大的趋势,与 JB-9014 炸药的化学反应区较宽且 CJ 面后仍有可观放能的性质相吻合。

References:

[1] Kury J W, Hornig H C, Lee E L, et al. Metal acceleration by chemical explosives [C]//The Fourth Symposium (International) on Detonation. White Oak, Maryland, USA, 1965: 3-13.

[2] Yu C, Liu W H, Li L Z, et al. Studies on cylinder test and JWL equation of state of detonation product for insensitive high explosive [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 1997, 11(3): 227-233. (in Chinese)
于　川, 刘文翰, 李良忠, 等. 钝感炸药圆筒试验与爆轰产物 JWL 状态方程研究 [J]. 高压物理学报, 1997, 11(3): 227-233.

[3] Yu C, Li L Z, Huang Y M. Studies on JWL equation of state of detonation product for aluminized explosive [J]. Explosion and Shock Waves, 1999, 19(3): 274-279. (in Chinese)
于　川, 李良忠, 黄毅民. 含铝炸药爆轰产物 JWL 状态方程研究 [J]. 爆炸与冲击, 1999, 19(3): 274-279.

[4] Chen L, Feng C G, Huang Y M. The cylinder test and JWL equation of state detontion product of aluminized explosives [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2001(3): 13-15. (in Chinese)

陈 朗,冯长根,黄毅民. 含铝炸药圆筒试验及爆轰产物 JWL 状态方程研究 [J]. 火炸药学报,2001(3):13-15.

[5] Chen L,Li Z R. The cylinder tests measured by VISAR interferometer [J]. Explosion and Shock Waves,2001,21(3):229-232. (in Chinese)
陈 朗,李泽仁. 激光速度干涉仪测量法在炸药圆筒试验中的应用 [J]. 爆炸与冲击,2001,21(3):229-232.

[6] Tan C W,Wang F C,Li S K,et al. Deformation and fracture of cylindrical tube under inside-explosive loading [J]. Explosion and Shock Waves,2003,23(4):305-308. (in Chinese)
谭成文,王富耻,李树奎,等. 内爆炸加载条件下圆筒的膨胀、破裂规律研究 [J]. 爆炸与冲击,2003,23(4):305-308.

[7] Yang Z Y,Yang D M,Wang F C. Deformation and fragmentation of explosively loaded steel tubes [J]. Material Science and Technology,2001,9(1):42-46. (in Chinese)
杨卓越,杨道明,王富耻. 内部爆炸加载条件下钢管变形与破碎研究 [J]. 材料科学与工艺,2001,9(1):42-46.

[8] Yu C,Liu W H,Li L Z,et al. Studies on the JWL equation of state of detonation products for RHT-902 and Octol [J]. Explosion and Shock Waves,1993,13(2):172-177. (in Chinese)
于 川,刘文翰,李良忠,等. RHT-902 和 Octol 炸药爆轰产物 JWL 状态方程研究 [J]. 爆炸与冲击,1993,13(2):172-177.

[9] Shi J. Studies on expansions of cylinders charged with high explosives and JWL equation of state [J]. Projectile & Rocket Technology,1994(2):64-72. (in Chinese)
石 健. 关于装填高能炸药圆筒的膨胀和 JWL 状态方程式 [J]. 弹箭技术,1994(2):64-72.

[10] Sun Z F,Li Q Z,Sun X L,et al. Study on standard cylinder test technology and data processing method [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics,2008,22(2):160-166. (in Chinese)
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.

[11] Sun Z F,Xu H,Li Q Z,et al. Further study on JWL equation of state of detonation product for insensitive high explosive [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics,2010,24(1):55-60. (in Chinese)
孙占峰,徐 辉,李庆忠,等. 钝感高能炸药爆轰产物 JWL 状态方程再研究 [J]. 高压物理学报,2010,24(1):55-60.

[12] Xu H,Sun Z F,Li Q Z. Methods of uncertainty evaluation and data processing of standard cylinder test [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology,2010,30(5):626-630. (in Chinese)
徐 辉,孙占峰,李庆忠. 标准圆筒试验数据处理和不确定度评定方法 [J]. 北京理工大学学报,2010,30(5):626-630.

An Experimental Study on the Capacity for Work of Insensitive High Explosive

XU Hui[1],SUN Zhan-Feng[2]

(1. *College of Mathematics and Computer Science, Mianyang Normal University, Mianyang* 621000, *China*;
2. *Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*)

Abstract: The capacity for work of insensitive high explosive JB-9014 was studied and compared with high explosive JOB-9003, by improved standard cylinder test, in which combined streak photography and laser interference technique. The results indicate that the capacity for work of JB-9014 is less than that of JOB-9003 evidently. After the expanding velocity is relatively stable, the capacity for work of JB-9014 is about 68.56% of JOB-9003 at the same expanding time and about 69.39% at the same radial displacement. The ratio of capacity for work of JB-9014 and JOB-9003 increases with expanding time and radial displacement gradually, which is consistent with the distinct performance of insensitive high explosive.

Key words: insensitive high explosive; cylinder test; capacity for work