文章编号:1000-5773(2008)02-0160-07

标准圆筒试验技术与数据处理方法研究*

孙占峰,李庆忠,孙学林,吴建华,汤铁钢

(中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理实验室,四川绵阳 621900)

摘要:对标准圆筒试验技术与数据处理方法进行了深入研究,在狭缝扫描实验中建立了新型、高效的照明技术、底片判读方法以及数据处理方法,得到了精度高、信息丰富的圆筒壁质点上的位移、速度、加速度和比动能结果。同时,通过 VISAR 技术直接测量了圆筒外表面径向膨胀速度-时间曲线,进而积分得到位移-时间曲线,与狭缝扫描结果相互印证和补充,进一步提高了测试可靠性。

关键词:圆筒试验;狭缝扫描;VISAR

中图分类号:O384 **文献标识码**:A

1 引 言

圆筒试验(Cylinder Test)由美国 LLNL 的 Kury 等人首先提出和应用[1],是专门用于确定炸药爆轰产物 JWL 状态方程和评估炸药作功能力的标准化实验。圆筒试验在国内外都得到了广泛应用,采用的试验方法也基本相同,一般将炸药样品装在特定尺寸的标准圆筒内,用高速扫描相机记录定常滑移爆轰驱动下圆筒壁的径向膨胀距离与时间的变化关系,并利用经验公式计算圆筒壁的膨胀速度和比动能等表征炸药作功能力的特征量。

为了规范圆筒试验,我国制定了国军标《标准圆筒试验法》(GJB 772A-1997)。国内外已进行的圆筒试验[1-9]大都参照此标准执行或采用与本标准类似的实验方法。限于当时实验条件、测试技术和数据处理方法等影响,实验数据精度不高。本工作对圆筒试验的测试技术和数据处理方法进行了全面、系统的研究,建立了试验和数据处理精度都更高的标准圆筒试验技术。

2 试验布局及测试技术

圆筒试验布局见图 1,采用狭缝扫描和 VISAR 联合测试方法。主炸药以 JOB-9003 为例,尺寸为 ∅25 mm×300 mm;圆筒内径∅25 mm,壁厚 2.5 mm,材料为紫铜。狭缝扫描采用平行光后照明技术,狭缝位置距起爆端 200 mm,相机转速 6×10^4 r/min,对应的扫描速度为 3 km/s。VISAR 测试与狭缝扫描光路垂直,光纤探头前端距装置外表面 75 mm,且光路与静态装置外表面垂直。VISAR 测试位置与狭缝扫描位置对应,距起爆端 200 mm。VISAR 测试采用双灵敏度,条纹常数分别为 316 m/(s·Fr)和 392 m/(s·Fr)。同时,在圆筒末端的定常滑移爆轰段采用电探针法测定炸药爆速。

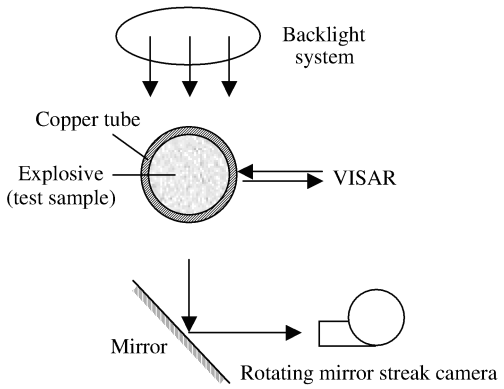


图 1 VISAR 与扫描测试布局图

Fig. 1 Layout of VISAR and streak

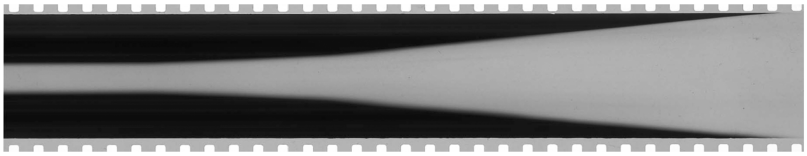
* **收稿日期**:2007-08-13;**修回日期**:2007-11-27

作者简介:孙占峰(1976—),男,博士研究生,助理研究员,主要从事冲击波与爆轰物理研究. E-mail:sunzf7695@163.com

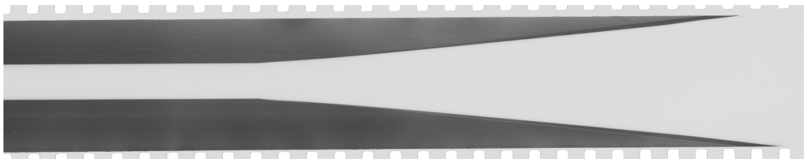
3　狭缝扫描照相技术研究

3.1　照明技术研究

传统的氩气弹照明光源以及炸药加透镜等方法,不仅成本高,而且为一次性不可重复装置,不可能通过静态照相方法确认试验状态;而且,非平行光后照明无法克服底片上圆筒膨胀拐点和边界的模糊现象,参见图 2(a)。本研究对照明技术进行了改进,采用了脉冲氙灯加平行光管的平行光后照明系统。此照明系统的光线平行度高,拍摄到的圆筒膨胀拐点和边界清晰,且可以较清晰地拍摄到圆筒壁外空气冲击波的波头轨迹,参见图 2(b);此外,可以通过静态照相方法检验照明效果,且通过适当防护可以重复使用。



(a) A typical negative using nonparallel light



(b) A typical negative using parallel light

图 2　典型圆筒膨胀过程扫描照相底片

Fig. 2　Typical negatives of streak photography of cylinder expansion process

3.2　底片判读方法研究

圆筒试验传统的底片判读方法为使用工具显微镜,首先通过人工目测确定壁的起跳位置,然后沿膨胀迹线每隔一定径向距离读出边界点的纵坐标和横坐标,再根据图像放大率和扫描速度算出壁的膨胀距离($R-R_0$)和对应的膨胀时间 t,从而得到一系列的(R_j-R_0)-t_j 数据。这种底片判读方法工作量大,且不可避免地要受人为因素影响,起跳点难于识别和判读,边界判读对准误差大,结果重复性差,而且判读点是人为确定的一系列离散点,无法充分获取底片信息。

本研究采用了一种新的底片判读方法,即首先利用专业底片扫描仪扫描底片得到高精度扫描图像;然后通过自行编制的边界处理程序沿 y 方向寻找图形像素中黑密度发生显著变化的位置,将黑密度变化曲线中斜率极大值位置定义为边界,并给出圆筒外界面膨胀迹线和界面坐标数据文件;最后根据图像放大率和扫描速度处理数据文件得到圆筒外界面膨胀距离和时间数据。典型边界膨胀迹线处理结果见图 3,可以清晰看到圆筒外界面膨胀迹线(内部)和圆筒壁前方空气冲击波波头运动迹线(外侧)。界面坐标数据文件包含图 3 中四条迹线上所有像素点的 x 坐标和各点距圆筒轴线的距离,单位为像素。横坐标数据包含时间信息,纵坐标数据为膨胀量信息。图形像素尺寸为 0.05 mm ×0.05 mm,图中迹线宽度为一个像素。另外,使用传统工具显微镜法对几幅底片进行了判读,结果与新底片判读方法得到的结果相符,表明新判读方法不但可靠,而且起跳点和边界判读更加准确,并能取得更丰富的底片信息。

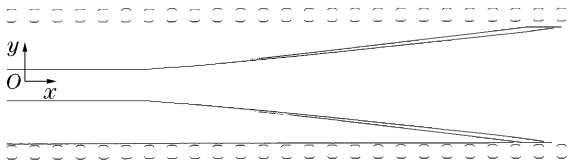


图 3　边界膨胀迹线处理图像

Fig. 3　A diagram of cylinder expansion track

根据图像放大率处理 y 轴方向数据得到迹线上各点的径向膨胀距离(R_j-R_0),进而得到两侧边界

径向膨胀距离的平均值。将 y 方向数据开始增加的点取为起跳点，并将该时刻作为时间零点($t=0$)。根据图形像素尺寸和扫描速度处理 x 方向数据，并考虑到时间零点，得到与径向膨胀距离(R_j-R_0)相对应的时间 t_j。由于数据量非常大(每条迹线仅膨胀部分就包含 1 000 多个像素，与之对应包含 1 000 多组数据)，本文没有列出(R_j-R_0)-t_j 数据表，只给出根据数据表绘制的曲线，如图 4 所示。

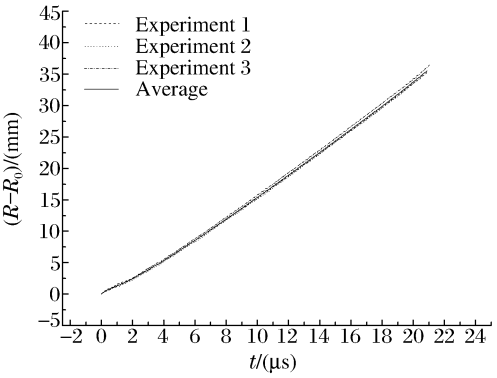


图 4 ($R-R_0$)-t 曲线

Fig. 4 ($R-R_0$)-t curves

3.3 数据处理方法研究

3.3.1 传统数据处理方法及分析

狭缝扫描实验直接得到的是圆筒壁外界面某空间位置处的径向壁位移-时间数据，为了衡量炸药作功能力，需要对数据进行处理，计算速度和比动能。

N. E. Hoskin 等人经验地认为，在定常滑移爆轰段，公式(1)能较好地描述圆筒试验中筒壁膨胀特征。国军标《标准圆筒试验法》也提出利用公式(1)对实验数据进行拟合，式中 A、B、C、D 为拟合参数。

$$t=A+B(R-R_0)+C\cdot\exp[D(R-R_0)] \tag{1}$$

两侧对时间求导，得到外表面径向壁速度随径向壁位移变化的关系

$$u=\frac{1}{B+CD\cdot\exp[D(R-R_0)]} \tag{2}$$

然后，按公式(3)计算比动能

$$e=\frac{1}{2}u^2 \tag{3}$$

文献[2-8]采用的方法与上述方法类似，仅是对拟合公式(1)进行了简化，将指数项 Taylor 展开成多项式，并取三阶或四阶近似。

上述方法采用的拟合公式(1)完全由经验给出，求导运算缺乏理论依据，会引入较大误差，而且给出的速度曲线(尤其是膨胀后期)表现出加速度越来越大的异常现象。

3.3.2 新数据处理方法研究[10-11]

为了建立定常滑移爆轰驱动下圆筒膨胀曲线的解析表达式，假定爆轰波阵面后面爆轰产物压力和圆筒壁径向加速度呈指数形式降低

$$\frac{\mathrm{d}^2r_\mathrm{m}}{\mathrm{d}t^2}=\sum_{j=1,n}a_jb_j^2\exp(-b_jt_\mathrm{i}) \tag{4}$$

r_m 为圆筒质量中心面(后面简称中心面)半径，它与圆筒外半径 r_e 和内半径 r_i 满足如下关系

$$r_\mathrm{e}^2-r_\mathrm{m}^2=r_\mathrm{m}^2-r_\mathrm{i}^2=A_0/2\pi \tag{5}$$

A_0 为圆筒横截面积，这里假定其在圆筒膨胀过程中保持不变。t_i 是时间，其时间零点是圆筒中心面开始运动时刻，实验数据中时间 t 的时间零点为圆筒外界面开始运动时刻，二者存在时间差 t_0，即

$$t_\mathrm{i}=t+t_0 \tag{6}$$

在时间限(0，t_i)内对(4)式作两次积分，便得到中心面处的径向壁速度($\mathrm{d}r_\mathrm{m}/\mathrm{d}t$)和径向壁位移($r_\mathrm{m}-r_{\mathrm{m}0}$)的解析表达式

$$\frac{\mathrm{d}r_\mathrm{m}}{\mathrm{d}t}=\sum_{j=1,n}a_jb_j[1-\exp(-b_jt_\mathrm{i})] \tag{7}$$

$$r_\mathrm{m}-r_{\mathrm{m}0}=\sum_{j=1,n}a_j\{b_jt_\mathrm{i}-[1-\exp(-b_jt_\mathrm{i})]\} \tag{8}$$

以上各式用中心面处的运动代表圆筒壁的运动。(8)式为中心面处的径向壁位移($r_\mathrm{m}-r_{\mathrm{m}0}$)-$t_\mathrm{i}$ 解析表达式，而扫描实验直接得到的是外表面上的径向壁位移($r_\mathrm{e}-r_{\mathrm{e}0}$)-$t$ 数据，于是利用(8)式进行拟合前需要利用公式(5)处理实验数据，将外表面上的数据转换成中心面处的数据。图 5 是处理得到的外表面、中

心面和内表面处径向壁位移随时间变化曲线。利用公式(8)(取 $j=2$),对(r_m-r_{m0})-t 数据进行非线性最小平方拟合,图 6 是拟合曲线与原位移数据曲线的比较。拟合得到的 5 个参数 a_1、a_2、b_1、b_2 和 t_0 的值见表 1。然后,根据(7)式和(4)式分别计算中心面处的径向壁速度和径向壁加速度。

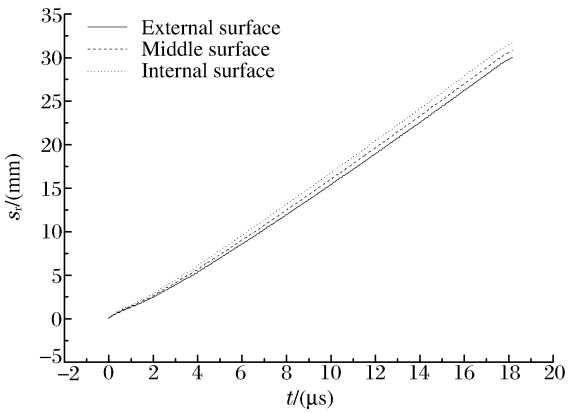


图 5　外表面、中心面和内表面处的径向壁位移曲线

Fig. 5　Radial wall displacements of external surface, middle surface and internal surface

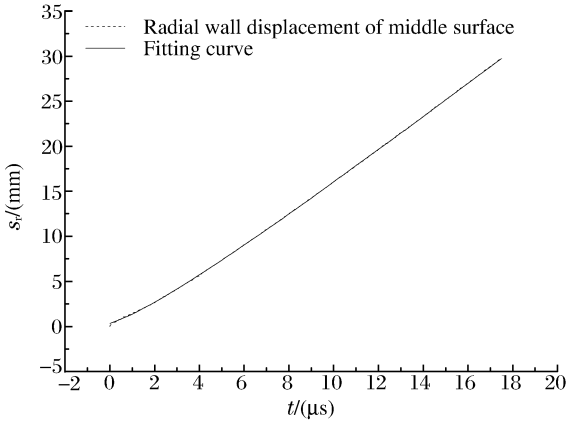


图 6　中心面处径向壁位移拟合曲线

Fig. 6　Fitting curve of radial wall displacement of middle surface

表 1　圆筒膨胀曲线拟合参数值

Table 1　Curve-fitting parameters of the cylinder expansion

Test type	a_1/(mm)	a_2/(mm)	b_1/(μs^{-1})	b_2/(μs^{-1})	t_0/(μs)
JOB-9003(∅25 mm)	3.322 5	1.069 09	0.217 91	1.064 64	0.798 63

3.3.3　速度修正

狭缝扫描实验得到的径向位移-时间数据,是固定空间位置处的值。为了得到真正与质点相联系的壁速度,必须对实验数据进行修正。本研究将从分析圆筒质点的膨胀轨迹入手(见图 7),固定位移修正时间。

用高速扫描相机记录圆筒膨胀,记下 Q 点和 P 点在时刻 t_1 和 t_2 的位置。在圆筒膨胀之前,其起始位置在 Q'点和 P'点处。经过 t_1 和 t_2 时间,爆轰波阵面走到了新的位置 Dt_1 和 Dt_2。事实上,在被扫描相机记录以前,Q'点和 P'点已经开始膨胀了。因此,质点的运动时间设为 τ,要大于相机所测到的时间。若观察圆筒上 P 点,其坐标为

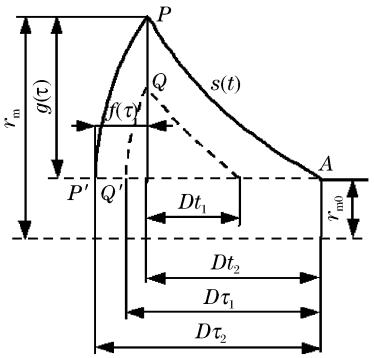


图 7　圆筒质点的膨胀轨迹示意图

Fig. 7　Schematic of particle track of tube

$$g(\tau)=r_m(t)-r_{m0} \tag{9}$$

$$f(\tau)=D(\tau-t) \tag{10}$$

除了膨胀开始阶段,可以认为壁材料不可压缩,于是弧长 $s(t)$等于爆轰波轨迹 AP'。高速分幅摄影实验和数值计算结果都表明,圆筒膨胀边界 AP 近似为直线,即膨胀过程中膨胀角 θ 近似保持不变,约为 11.2°。于是得到微分关系

$$\frac{\mathrm{d}\tau}{\mathrm{d}t}=\sqrt{1+\left(\frac{1}{D}\frac{\mathrm{d}r_m}{\mathrm{d}t}\right)^2}=\frac{1}{\cos\theta} \tag{11}$$

膨胀角 θ 可根据(12)式计算

$$\frac{\mathrm{d}r_m}{\mathrm{d}t}=u_r=D\tan\theta,\ \text{即}\ \tan\theta=\frac{u_r}{D} \tag{12}$$

式中：u_r 是径向壁速度。

将(9)式和(10)分别对时间 τ 求导，便得到质点速度的径向分量 u_{rs} 和轴向分量 u_{as}

$$u_{rs}=\frac{dg}{d\tau}=\frac{dr_m}{dt}\cdot\cos\theta=D\cdot\sin\theta \tag{13}$$

$$u_{as}=\frac{df}{d\tau}=D(1-\cos\theta) \tag{14}$$

质点速度按下式计算

$$u_s=\sqrt{u_{rs}^2+u_{as}^2} \tag{15}$$

比动能 e 按(3)式计算，只是将径向壁速度换成了质点速度。

进而计算质点加速度 a_s，按下式计算

$$a_s=\sqrt{a_{rs}^2+a_{as}^2} \tag{16}$$

其中

$$a_{rs}=\frac{d^2g}{d\tau^2}=\frac{d^2r_m}{dt^2}\cdot\cos^4\theta \tag{17}$$

$$a_{as}=\frac{d^2f}{d\tau^2}=\sin\theta\cdot\cos^3\theta\cdot\frac{d^2r_m}{dt^2} \tag{18}$$

图 8 和图 9 是按上述方法计算得到的速度和加速度随时间变化曲线的比较结果。由图可见，质点速度以径向分量为主，轴向分量约为径向分量的 10%，径向分量和质点速度相差不到 1%，这一点得到了数值计算结果的支持。质点速度比径向壁速度稍低，稳定后速度降低量在 1%～2%之间。径向壁速度与质点速度的相对偏差为 $(u_r-u_s)/u_r=(\tan\theta-\sqrt{\sin^2\theta+(1-\cos\theta)^2})/\tan\theta$，高速分幅摄影结果给出 $\theta\approx11.2°$，于是得到相对偏差约为 1.4%，在 1%～2%之间。另外，质点加速度以径向分量为主，轴向分量贡献很小。

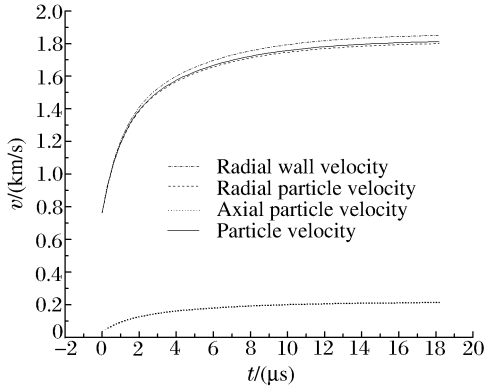


图 8 速度-时间曲线

Fig. 8 Velocity-time curves

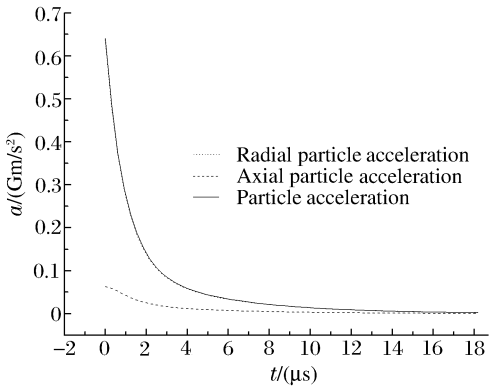


图 9 加速度-时间曲线

Fig. 9 Acceleration-time curves

4 VISAR 测试结果及与狭缝扫描照相结果比较

狭缝扫描法直接测得的是位移-时间曲线，速度-时间曲线是由位移-时间微分后得到的间接测量结果，无法体现速度连续变化的细节，是一种平均效果。VISAR 直接测得的是瞬时速度随时间变化的连续曲线，能够体现速度波动上升过程的具体细节，能够较好地补充狭缝扫描法的不足。对 VISAR 测得的速度-时间曲线积分一次也可得到位移-时间曲线。图 10 和图 11 分别是用 VISAR 和狭缝扫描法得到的圆筒外表面速度-时间曲线和位移-时间曲线的比较。由图可见，两种方法得到的速度-时间曲线基本吻合，位移-时间曲线几乎完全重合。可见，VISAR 测试在直接取得更丰富速度信息的基础上，测试结果与狭缝扫描结果相符，进一步证明了狭缝扫描照相技术、数据处理方法以及基本假定的可行性和合

理性,提高了实验数据的可靠性,是狭缝扫描法的重要补充。

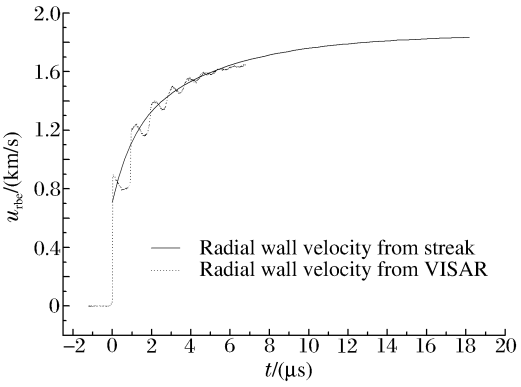


图 10　VISAR 和扫描得到的径向壁速度比较

Fig. 10　Comparision of radial wall velocities from VISAR and streak

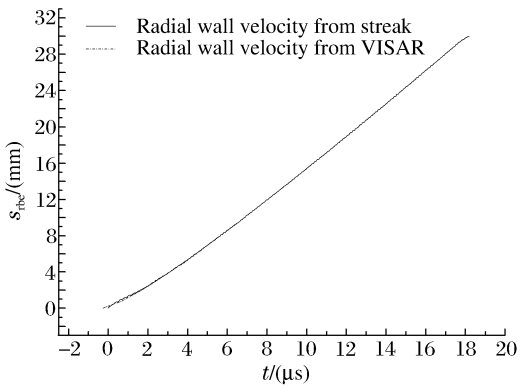


图 11　VISAR 和扫描得到的径向壁位移比较

Fig. 11　Comparision of radial wall displacements from VISAR and streak

5　结　论

(1) 建立了狭缝扫描实验中可以重复使用的脉冲氙灯平行光后照明技术,该技术不仅可以在试验前通过静态照相方法确认试验状态,且能够取得圆筒膨胀拐点和边界更清晰的底片;

(2) 建立了全新底片判读方法,实现了程序自动连续判读,克服了人工判读引起的起跳点难于准确识别、边界对准误差大、结果重复性差等不足;

(3) 采用了新数据处理与修正方法,得到了精度更高、信息更丰富的圆筒壁质点上的位移、速度、加速度和比动能结果;

(4) VISAR 和狭缝扫描方法相互印证和补充,在取得更丰富圆筒膨胀信息的同时,进一步提高了测试的可靠性。

References:

[1] Kury J W. Metal Accelaration by Chemical Explosives [A]//4th Symp on Detonation-1965 [C]. Maryland: White Oak, 1966: 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 J 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 Tube [J]. Materials Science & 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 JWL Equation of State of Detonation Product for RHT2902 and Octol [J]. Explosion and Shock Waves, 1993, 13(2): 172-177. (in Chinese)
于 川,刘文翰,李良忠,等.RHT2902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 and 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[J].弹箭技术,1994,(2):64-72.

[10] 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: 18-24.

[11] Muhamed S. The Methods of Testing Explosives [M]. Translated by Shao Y B. Mianyang: Institute of Fluid Physics, CAEP, 1998: 156-166. (in Chinese)
穆哈迈德·苏塞斯卡.炸药测试方法[M].邵英斌,译.绵阳:中国工程物理研究院流体物理研究所,1998:156-166.

Study on Standard Cylinder Test Technology and Data Processing Method

SUN Zhan-Feng, LI Qing-Zhong, SUN Xue-Lin,
WU Jian-Hua, TANG Tie-Gang

(*Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*)

Abstract: Standard cylinder test technique and data processing method were studied, and new effective techniques of lighting, negative interpretation and data processing for slit scan experiments were established, and the results of displacement, velocity, acceleration and specific kinetic energy of the cylinder wall particle with high precision and abundant information were obtained. VISAR was used to measure the cylinder expansion velocity and displacement simultaneously. The obtained results are consistent with those from slit scan experiments. The testing reliability was further improved.

Key words: cylinder test; slit scan; VISAR