

文章编号:1006-9941(2023)07-0707-07

# 探针式圆筒试验方法及 TNT 炸药爆轰产物 JWL 状态方程参数标定

崔浩<sup>1</sup>,武军安<sup>1</sup>,周昊<sup>2</sup>,杨永亮<sup>1</sup>,邢柏阳<sup>3</sup>,陈雄<sup>1</sup>,郭锐<sup>1</sup>

(1. 南京理工大学机械工程学院,江苏 南京 210094; 2. 南京理工大学国家特种超细粉体工程技术研究中心,江苏 南京 210094; 3. 四川航天系统工程研究所,四川成都 610100)

**摘要:** 圆筒试验是目前标定炸药爆轰产物状态方程参数最常用的试验之一,为了确定炸药爆轰产物 JWL 状态方程参数,设计并搭建了探针式圆筒试验平台。采用一组具有径向位移差的镀金探针和 20 ns 高精度脉冲测时仪记录圆筒膨胀过程中的多个离散点,当圆筒在爆轰产物驱动下膨胀到探针头部形成回路时,脉冲测时仪记录下时间,据此可获得圆筒壁的位移时程曲线。研究开展了两组 TNT 炸药的探针式圆筒试验,得到了圆筒膨胀位移离散点,试验结果显示两组试验曲线相差较小,表明探针式圆筒试验具有较好的重复性。采用 BP-GA 算法确定了 TNT 炸药的爆轰产物 JWL 状态方程参数,将确定的 JWL 参数代入有限元软件进行数值检验,结果显示仿真得到的位移曲线相对试验曲线的决定系数  $R^2$  为 0.9997,表明 JWL 参数具有较高的精度。

**关键词:** 探针式圆筒试验;脉冲测时仪;JWL 状态方程;TNT 炸药

中图分类号: TJ55;O389

文献标志码: A

DOI:10.11943/CJEM2023066

## 0 引言

美国 LLNL 实验室设计的圆筒试验<sup>[1]</sup>通过测量圆筒壁在炸药爆轰产物驱动下的运动过程来表征爆轰产物的绝热膨胀,在圆筒试验中通常记录圆筒壁径向膨胀的位移时程曲线,用于反映炸药的做功能力和标定炸药爆轰产物状态方程等<sup>[2-5]</sup>。圆筒试验对于确定炸药爆轰产物 JWL 状态方程参数、表征炸药绝热膨胀特性以及评估炸药做功能力等工作具有重要意义。

目前有两种较为常见的圆筒试验方法,其中应用最为广泛的标准圆筒试验采用高速扫描相机和氩气弹等设备直接记录圆筒壁的膨胀过程<sup>[6]</sup>;另一种为记录圆筒膨胀过程中一系列离散点的 T-20 试验方法<sup>[7-8]</sup>。T-20 试验方法采用一组搭载于有机玻璃的光

导纤维来记录圆筒膨胀到预定位移的时间,当圆筒撞击有机玻璃时产生亮光,光学脉冲测时器记录下亮光时间,据此可获得一组圆筒膨胀位移离散点。近年来,随着采集技术的发展,出现了采用 PDV 直接测量圆筒膨胀速度的试验方法<sup>[9]</sup>,以及和 T-20 试验技术相似的采用电离探针的试验方法<sup>[10-11]</sup>。除了新型测试技术的发展外,相关学者还开发了新型试验技术以标定炸药 JWL 状态方程,例如提出了采用激光速度干涉仪测量飞片速度历程的飞片试验<sup>[12-13]</sup>以及采用电阻丝探针测量爆轰波曲线的水下爆炸试验<sup>[14-15]</sup>等,但技术发展成熟且原理简单的圆筒试验仍然是目前使用最广泛的标定试验之一,且根据圆筒试验建立的理论模型便于表征爆轰产物的驱动加速能力和标定爆轰产物状态方程参数等。

基于 T-20 试验方法思想和电离探针试验思路,本研究设计并搭建了一种新型探针式圆筒试验平台,采用一组具有径向位移差的探针和高精度脉冲测时仪记录圆筒膨胀过程中的多个离散点。开展了 TNT 炸药的探针式圆筒试验,并由此确定了 TNT 炸药爆轰产物的 JWL 状态方程参数,为炸药状态方程新型标定试验的设计提供参考。

收稿日期:2023-03-30;修回日期:2023-04-24

网络出版日期:2023-05-10

基金项目:国家自然科学基金(12202200,11972197和21875109)和中国博士后科学基金资助项目(2022M711641)

作者简介:崔浩(1993-),男,博士,主要从事爆炸力学与弹药安全性研究。e-mail:cuihao\_93@126.com

通信联系人:郭锐(1980-),男,教授,主要从事爆炸力学与毁伤技术研究。e-mail:guorui@njust.edu.cn

引用本文:崔浩,武军安,周昊,等. 探针式圆筒试验方法及 TNT 炸药爆轰产物 JWL 状态方程参数标定[J]. 含能材料,2023,31(7):707-713.

CUI Hao, WU Jun-an, ZHOU Hao, et al. Probe Cylinder Test Method and Calibration of JWL Equation of State of Detonation Products for TNT Explosive[J]. Chinese Journal of Energetic Materials (Hanneng Cailiao), 2023, 31(7):707-713.

## 1 探针式圆筒试验设计

### 1.1 圆筒试验布局

本研究参照文献[10]和文献[11]采用电离探针记录圆筒膨胀过程中的几个离散点,在其试验设计思路的基础上,搭建了探针式圆筒试验平台,利用“通靶电路”记录圆筒膨胀到预定位置的时间。当圆筒膨胀触碰到镀金探针头部形成回路时,高速脉冲测时仪记录回路形成时间,通过一组具有径向位移差的探针便可记录圆筒膨胀过程中的诸多离散点。根据圆筒试验所用的无氧铜具有良好的导电性以及圆筒壁移动速度较高的特点,专门开发了高精度脉冲测时仪,其采样间隔为 20 ns,可满足试验精度要求。

本研究设计的探针式圆筒试验的示意图如图 1 所示,试验设备主要包括 OFHC 无氧铜管(采用标准圆筒试验尺寸,内径  $\Phi 25.4$  mm,壁厚 2.606 mm)、高能起爆药、雷管、镀金探针、精密平行块、测速电线、炸药试样、20 ns 脉冲测时仪及相应的采集设备等。装填炸药试样的 OFHC 铜管垂直固定于底座中心,一组镀金探针安装在距离圆筒头部 200 mm 的同一水平面,该水平面由专门为探针圆筒试验设计的探针支架中的探针径向孔确定。圆筒外壁到各个探针头部的距离,即圆筒外壁的径向膨胀距离,采用平行精密块确定。当爆轰波阵面通过镀金探针平面时,炸药内部化学能得到释放,未反应炸药转换成高压爆轰产物,圆筒壁在爆轰产物的驱动下向外膨胀。在试验中圆筒接地,各个探针与圆筒组成的电路为“断路”,而当圆筒膨胀到各个探针头部时电路接通,脉

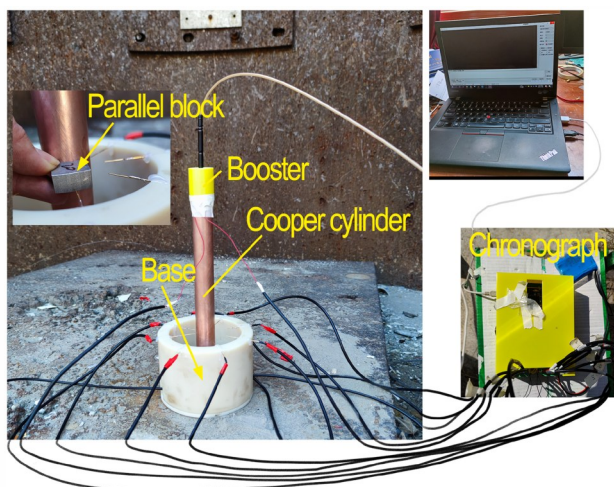


图 1 探针式圆筒试验示意图

Fig.1 Schematic diagram of the probe cylinder test

冲测时仪记录下“通路”的形成时间(与目前常用的“通靶”测速电路的原理相同,每个探针即相当于一个“通靶”)。试验过后根据各个探针头部距离圆筒外壁的距离及电路的接通时间,可获得由一系列离散点组成的圆筒壁位移曲线。此外,在铜管的顶部和底部分别安装两段连续电线,当爆轰波阵面经过铜管两端时,爆轰产物内部的电离场将会导通电路,根据两个电路的接通时间差以及圆筒的长度可得炸药的爆速。

本研究先后设计了 10 通道和 18 通道的高速脉冲测时仪,其中脉冲测时仪的 2 通道与测量炸药爆速的电线连接,其余通道与镀金探针连接(10 通道和 18 通道测时仪分别与 8 个和 16 个探针连接)。除通道数不同外,10 通道和 18 通道脉冲测时仪的采样频率和采样原理均相同。圆筒膨胀前期由于应力波和稀疏波的作用,圆筒壁向外膨胀的加速度较大,且膨胀速度具有波动性,而圆筒膨胀后期随着爆轰产物压力的降低,圆筒壁膨胀加速度较小,膨胀速度相对稳定。考虑到圆筒膨胀过程中不同阶段的运动特性,设置圆筒膨胀前期的探针排列密度较大,而后期排列密度较低。以采用 10 通道脉冲测时仪的探针式圆筒试验为例进行说明,探针的布局如图 2 所示,为了防止和圆筒壁接触后变形的探针误触后续待接通的探针,以圆筒轴线为中心,依次将镀金探针均匀分布到整个圆周,两个探针之间的夹角为 45 度(18 通道圆筒试验的探针之间夹角为 22.5 度)。探针径向孔起到固定和定向作用,使探针朝向并垂直圆筒轴线。标准圆筒试验中高速扫描照相机等采集设备放置于距离圆筒起爆端 200 mm 处,以消除端口效应,径向孔的位置同样距离圆筒头部起爆端 200 mm。

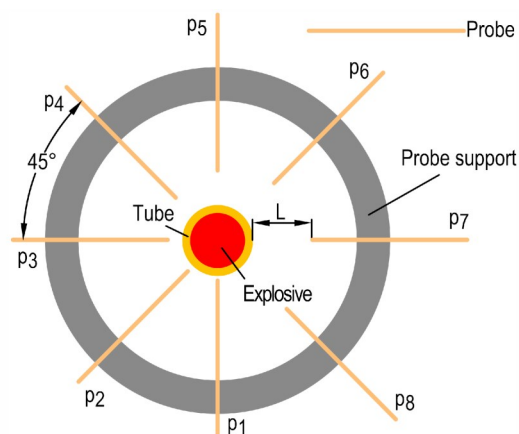


图 2 探针式圆筒探针布局

Fig.2 Probe distribution of the probe cylinder test

### 1.2 试验方案的设计依据

从经济性和科学性的角度出发,本研究设计了一种采用具有位移差的镀金探针和 20 ns 高速脉冲测时仪记录圆筒壁膨胀过程中一系列离散点的探针式圆筒试验,试验主要设计依据可总结为以下几点:

#### 1.2.1 OFHC 无氧铜良好的延展性和导电性

由于 OFHC 无氧铜具有良好的延展性,因此圆筒在膨胀初期不会发生破裂,且 Souers<sup>[16]</sup> 公布的圆筒试验数据显示,铜管可以膨胀到爆轰产物相对体积为 25 的距离(对应的圆筒外壁膨胀距离大于 45 mm),因此圆筒壁在膨胀过程中保持良好的完整性可以确保当圆筒壁接触探针时电路的接通。此外,逐渐变薄但未破裂的圆筒壁可保证铜管内的爆轰产物不会扩散出铜管而扰乱各个电路的接通(爆轰产物内部具有电离场)时间。

#### 1.2.2 圆筒试验向外膨胀的轴对称性

在 Yang<sup>[17]</sup> 和 Li<sup>[18]</sup> 的圆筒试验布局中,两个多普勒测速探头以圆筒轴为中心对称安装在圆筒两侧并同时记录圆筒壁膨胀的径向速度时程曲线,多组试验结果均显示在同一个试验中两个测速探头所测得的速度曲线几乎完全重复,表明在爆轰产物驱动下圆筒壁向外膨胀具有轴对称性。根据此特性,将镀金探针均匀分布在整个圆周,可防止探针和圆筒接触变形后相互影响。

#### 1.2.3 配套的高速数据采集系统

在 高能炸药的圆筒试验中,圆筒外壁的移动速度在后期可能超过 1500 m·s<sup>-1</sup>。为了测量高速移动的金属壁接触探针形成电路的时间,研发了专用的高精度脉冲测时仪,并以 20 ns 的采样间隔记录高速移动的金属壁和探针的连接时间,确保试验数据的有效性和高精度。

## 2 探针式圆筒试验结果与 JWL 状态方程

### 2.1 试验结果

本研究分别实施了 10 通道和 18 通道的 TNT 熔铸药柱的探针式圆筒试验各一组,TNT 药柱密度为 1.591 g·cm<sup>-3</sup>,10 通道和 18 通道圆筒试验测得试样的爆速分别为 6734 m·s<sup>-1</sup> 和 6790 m·s<sup>-1</sup>,平均爆速为 6762 m·s<sup>-1</sup>。在试验中脉冲测时仪记录下圆筒膨胀到各个探针头部的时间  $t_{test}$ ,并令圆筒膨胀到第一个探针的时间为记录起始点,圆筒膨胀距离为  $L$ ,整理两次试验数据后得到 TNT 炸药的圆筒试验结果如图 3 所示。

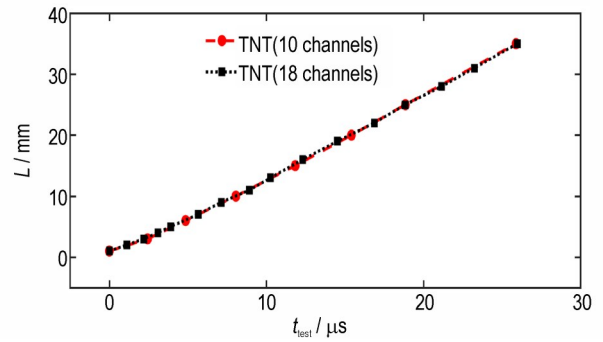


图 3 圆筒试验结果

Fig.3 Experimental results of probe cylinder test

观察图 3 可发现,10 通道和 18 通道的 TNT 炸药的数据曲线几乎重合,采用拟合数据和标准数据的残差之比  $R^2$  表示两条曲线的相似度, $R^2$  值越接近 1 表明两条曲线相似度越高。计算发现 18 通道相对于 10 通道的位移曲线的  $R^2$  值为 0.9996,表明圆筒试验具有良好的重复性、脉冲测时仪采集可靠,同时也反映了圆筒膨胀过程的轴对称性。在测得各个电路的接通时间  $t_{test}$  的基础上考虑圆筒膨胀到第一个探针的时间  $t_0$ ,可得圆筒膨胀到各个探针的实际时间为  $t = t_{test} + t_0$ 。将采集到的离散点拟合成基于爆轰产物压力指数下降假设的函数形式<sup>[19]</sup>:

$$L = \sum_{i=1}^2 a_i \left[ b_i (t_{test} + t_0) - \left( 1 - \exp(-b_i (t_{test} + t_0)) \right) \right] \quad (1)$$

式中, $a_i, b_i$  为 ( $i=1, 2$ ) 待定常数。式(1)对时间微分可得圆筒外壁移动速度  $u$ :

$$\begin{aligned} u &= \frac{dL}{dt} = \sum_{i=1}^2 a_i b_i \left[ 1 - \exp(-b_i (t_{test} + t_0)) \right] \\ &= \sum_{i=1}^2 a_i b_i \left[ 1 - \exp(-b_i t) \right] \end{aligned} \quad (2)$$

将两次圆筒试验数据的平均值采用 Matlab 软件 Trust-Region 算法按式(1)进行拟合,确定了位移函数中各待定常数的值(见表 1),试验结果和拟合函数的对比如图 4a 所示,将表 1 参数代入式(2)可得圆筒外壁移动速度时程曲线(见图 4b)。观察图 4b 可发现,由于爆轰产物膨胀前期内部压力较大,其驱动能力较强,圆筒壁在爆轰产物的驱动下迅速向外移动,且加速度较大。随着爆轰产物内部压力的降低,圆筒壁移动

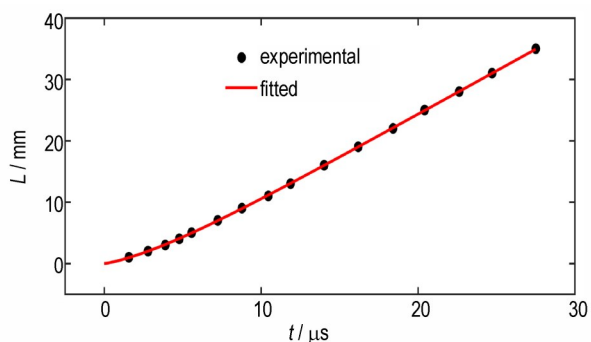
表 1 圆筒膨胀曲线拟合参数

Table 1 Fitting parameters of cylinder expansion curve

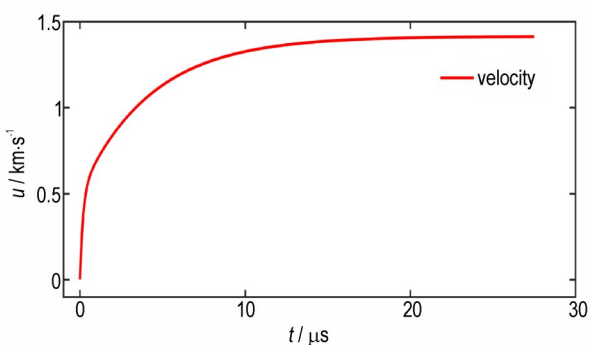
explosive	$a_1$	$b_1$	$a_2$	$b_2$	$t_0$
TNT	3.911	0.2332	0.09197	5.461	1.577

速度逐渐平稳, 膨胀后期圆筒壁速度几乎不再变化, 20  $\mu\text{s}$  时圆筒膨胀速度为  $1.406 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

文献[20]和文献[21]分别开展了密度为  $1.583 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  和  $1.63 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  的 TNT 炸药的圆筒试验, 图 5 为本研究采用探针式圆筒试验所测的 TNT 炸药的圆筒外壁位移曲线和文献[20]和[21]所测的 TNT 炸药的位移曲线对比, 观察图 5 可发现三条曲线相差较小(不同密度的 TNT 药柱略有差别导致曲线并未完全重合), 三条曲线的高度相似性证明了本研究提出的探针式圆筒试验的有效性和高精度。



a. Radial expansion displacement history



b. Radial expansion velocity history

图 4 圆筒膨胀距离时程曲线和速度时程曲线

Fig. 4 Radial expansion displacement and velocity histories of cylindrical wall

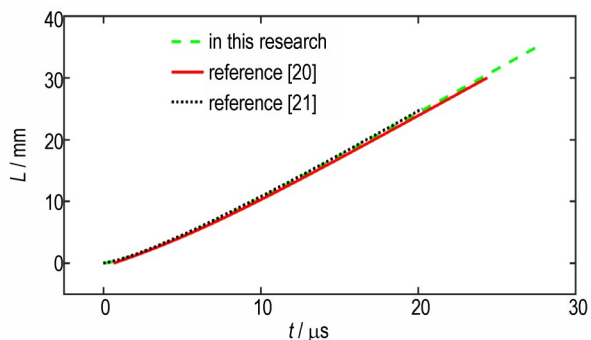


图 5 不同 TNT 的圆筒试验数据对比

Fig. 5 Comparison of cylinder test data for different TNT

## 2.2 JWL 状态方程参数的确定

等熵条件下 JWL 状态方程形式为<sup>[21]</sup>:

$$p = Ae^{-R_1 V} + Be^{-R_2 V} + CV^{-(\omega+1)} \quad (3)$$

式中,  $p$  为爆轰产物压力, GPa;  $V$  为爆轰产物相对比容;  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $\omega$  为 6 个常数。爆轰产物内能为:

$$E_s = \int_V p dV = \frac{A}{R_1} e^{-R_1 V} + \frac{B}{R_2} e^{-R_2 V} + \frac{C}{\omega} V^{-\omega} \quad (4)$$

在爆轰产物膨胀过程中, 其内能不断转换成圆筒壁和爆轰产物的动能, 两者的动能之和为<sup>[22-23]</sup>:

$$E_d = \left( \rho_m \left( \frac{R+x}{R_0 \cos \theta} \right)^2 \ln \left( \frac{R+x}{R} \right) + \frac{1}{4} \rho_0 \left( \frac{R+x}{R} \right)^2 \right) (u \cos \theta)^2 \quad (5)$$

式中,  $\rho_m$  和  $\rho_0$  分别为圆筒和炸药初始密度,  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ;  $R_0$  为圆筒初始内径, mm;  $R$  为圆筒膨胀过程中的内径, mm;  $x$  为壁厚, mm;  $\theta$  为圆筒壁角, ( $^\circ$ );  $u$  为圆筒壁速度,  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

爆轰产物的相对比容为:

$$V = \frac{(R_0 + x_0 + L)^2 + R_0^2 - (R_0 + x_0)^2}{R_0^2 \cos^2 \theta} \quad (6)$$

式中,  $x_0$  为初始圆筒壁厚, mm;  $L$  为圆筒膨胀位移, mm。结合式(5)、式(6)和圆筒试验数据可得 TNT 炸药爆轰产生的总动能随爆轰产物相对体积的变化曲线(见图 6)。观察图 6 可发现 TNT 炸药的总动能曲线变化趋势与图 4b 的速度变化曲线相似, 在爆轰产物膨胀前期, 爆轰产物和圆筒壁的速度快速增大, 总动能增长较快, 随着爆轰产物内部压力的降低, 爆轰产物和圆筒壁的动能增长变缓, 炸药内能转换总动能达到极限值, 相对体积均为 11 时爆轰产生的 Gurney 能为  $4.697 \text{ GJ}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

采用自编程 BP-GA 算法<sup>[24]</sup>和本研究的采集到的 TNT 炸药的圆筒试验数据确定了 TNT 的爆轰产物 JWL 状态方程参数, 如表 2 所示。

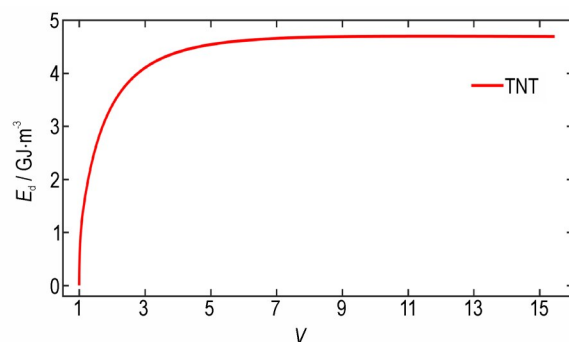


图 6 TNT 炸药爆轰产生的动能曲线

Fig. 6 The curve of kinetic energy generated by the detonation of TNT explosive

表 2 JWL 状态方程参数

Table 2 Parameters of JWL equation of state

explosive	A/GPa	B/GPa	C/GPa	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	ω
TNT	313.91	4.39	0.790	4.05	1.01	0.303

2.3 数值仿真实验

为了验证表 2 参数的有效性,将表 2 参数代入显式有限元软件 AUTODYN 进行圆筒试验的数值仿真计算。由于圆筒试验的对称性,建立二维轴对称模型,如图 7 所示。圆筒壁和炸药均采用拉格朗日算法以提高计算效率,铜管和炸药网格均小于 0.2 mm×0.2 mm。在距离起爆端一定距离的圆筒外壁设立一个高斯点,以记录圆筒壁的径向位移和膨胀速度。

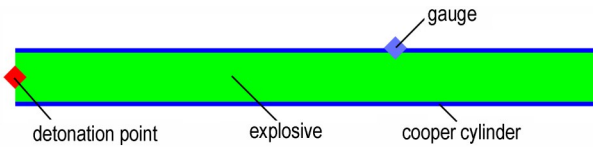


图 7 数值仿真模型

Fig.7 Numerical simulation model

TNT 炸药采用 JWL 状态方程,材料参数如表 2 所示。铜管采用 Steinberg-Guinan 强度模型<sup>[25]</sup>描述其力学行为,高应变率下剪切模量  $G$  和屈服应力  $Y$  作为有效塑性应变  $\varepsilon$ 、压力  $p$  和温度  $T$  的函数本构关系为:

$$G = G_0 \left[ 1 + \left( \frac{G'_p}{G_0} \right) \frac{p}{\eta^{1/3}} + \left( \frac{G'_T}{G_0} \right) (T - 300) \right] \quad (7)$$

$$Y = Y_0 (1 + \beta \varepsilon)^n G / G_0 \quad (8)$$

须符合受限条件:

$$Y_0 [1 + \beta \varepsilon] n \leq Y_{max} \quad (9)$$

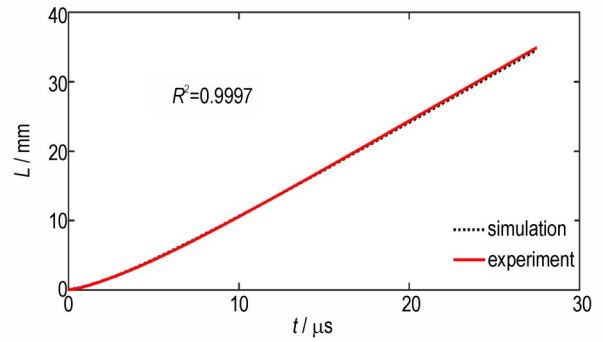
式中,  $\eta$  为比容与初始比容的比值;  $\beta$  和  $n$  分别为硬化常数和硬化指数; 下标 0 表示参考状态 ( $T=300$  K,  $p=0, \varepsilon=0$ ); 下标  $p$  和  $T$  的素数参数是该参数相对于参考状态下压力和温度的导数。Steinberg-Guinan 模型参数值均取自 AUTODYN 材料库(见表 3)。此外,采用 Mie-Grüneisen 状态方程<sup>[26]</sup>描述铜管在高压的状态,取冲击 Hugoniot 参数  $c=3940$  m·s<sup>-1</sup>, Grüneisen 系数为 2.02。

图 8 为试验数据和数值计算结果对比,观察图 8

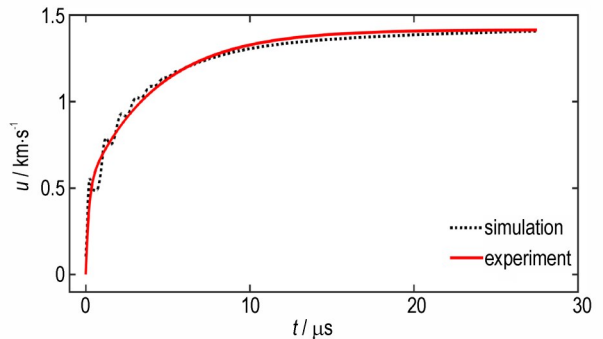
表 3 铜管材料(Steinberg-Guinan 模型)<sup>[27]</sup>

Table 3 Parameters of the copper tube (Steinberg-Guinan)<sup>[27]</sup>

G <sub>0</sub>	Y <sub>0</sub>	Y <sub>max</sub>	B	N	G' <sub>p</sub> /G <sub>0</sub>	G' <sub>T</sub> /G <sub>0</sub>	T <sub>m</sub> /K
/GPa	/GPa	/GPa					
47.7	0.12	0.64	36	0.45	28	0.38	1790



a. Radial displacement



b. Radial velocity

图 8 试验和仿真结果对比

Fig.8 Comparison of experimental and simulation results

可发现数值仿真计算得到的圆筒外壁位移和速度时程曲线均和试验数据吻合较好,且仿真得到的位移曲线相对试验曲线的决定系数  $R^2$  为 0.9997,表明表 2 参数适用于 TNT 炸药。

3 结论

设计并搭建了探针式圆筒试验平台,实施了 TNT 炸药的探针式圆筒试验,根据试验结果确定了 TNT 炸药爆轰产物 JWL 状态方程参数,主要结论如下:

(1) 设计了探针式圆筒试验平台,采用 1 组具有径向位移差的探针和 20 ns 高速脉冲测时仪记录圆筒膨胀过程中的多个离散点,当圆筒膨胀到探针头部形成回路时,脉冲测时仪记录下回路形成时间,通过一组探针可得圆筒膨胀位移时程曲线。

(2) 开展了 2 组 TNT 炸药的探针式圆筒试验,得到了两条位移时程曲线,结果显示 18 通道相对于 10 通道的位移曲线的  $R^2$  值为 0.9996,表明两条曲线相似度较好。同时将本研究的试验结果和文献中的进行对比,发现两者吻合较好,证明了探针式圆筒试验的有效性和高精度。

(3) 根据圆筒试验数据采用BP-GA算法确定了TNT炸药的爆轰产物JWL状态方程参数,代入显式有限元软件进行圆筒试验的数值计算,结果显示试验结果和仿真结果吻合较好,仿真得到的位移曲线相对试验曲线的决定系数 $R^2$ 为0.9997,证明JWL参数有效。

#### 参考文献:

- [1] Lee E L, Hornig H C, Kury J W. Adiabatic Expansion of High Explosive Detonation Products: UCRL-50422 [R]. California, Lawrence Radiation Laboratory, 1968.
- [2] 罗一鸣,沈飞,蒋秋黎,等.两种密度DNTF装药的驱动性能及其产物状态方程[J].火炸药学报,2021,44(2):175-180.  
LUO Yi-ming, SHEN Fei, JIANG Qiu-li, et al. Driving performance and JWL EOS of DNTF charge with two densities[J]. *Chinese Journal of Explosive & Propellants*, 2021, 44(2): 175-180.
- [3] 裴红波,钟斌,李星瀚,等.RDX基含铝炸药圆筒试验及状态方程研究[J].火炸药学报,2019,42(4):403-409.  
PEI Hong-bo, ZHONG Bin, LI Xing-han, et al. Study on the cylinder tests and equation of state in RDX based aluminized explosives [J]. *Chinese Journal of Explosive & Propellants*, 2019, 42(4): 403-409.
- [4] 冯晓军,薛乐星,曹芳洁,等.CL-20基含铝炸药组分微结构对其爆炸释能特性的影响[J].火炸药学报,2019,42(6):608-613.  
FENG Xiao-jun, XUE Le-xing, CAO Fang-jie, et al. Effect of ingredients microstructure of CL-20-based aluminum-containing explosives on explosion energy release [J]. *Chinese Journal of Explosive & Propellants*, 2019, 42(6): 608-613.
- [5] 南宇翔,蒋建伟,王树有,等.一种CL-20基压装混合炸药JWL状态方程参数研究[J].含能材料,2015,23(6):516-521.  
NAN Yu-xiang, JIANG Jian-wei, WANG Shu-you, et al. JWL equation of state of detonation product for CL-20 based pressed composite explosive [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials(Hanneng Cailiao)*, 2015, 23(6): 516-521.
- [6] SCOTT I J. Scaled cylinder test experiments with insensitive PBX 9502 explosive [C]//In Proceedings of the 15th International Detonation Symposium. USA: Office of Naval Research, 2014: 171-180.
- [7] ZHERNOKLETOV M V, GLUSHAK B L. Material properties under intense dynamic loading[M]. Springer; 2006.
- [8] Kuz'mitskii I V, Bel'skii V M, SHUKINA A N, et al. Energy release behind the Jouget point during detonation of plasticized PETN from the results of experiments by the T-20 method [J]. *Combustion, Explosion, and Shock Waves*, 2014, 50(2): 235-241.
- [9] 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.  
CHEN Lang, LI Ze-ren. The cylinder tests measured by VISAR interferometer[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2001, 21(3): 229-232.
- [10] Sanchidrián J A, CASTEDO R, López L M, et al. Determination of the JWL constants for ANFO and emulsion explosives from cylinder test data[J]. *Central European Journal of Energetic Materials*, 2015, 12(2): 177-194.
- [11] CASTEDO R, NATALE M, López L M, et al. Estimation of Jones-Wilkins-Lee parameters of emulsion explosives using cylinder tests and their numerical validation [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2018, 112: 290-301.
- [12] 赵锋,虞德水,彭其先,等.钝感炸药散心爆轰驱动平板飞片研究[J].含能材料,2011,19(5):527-531.  
ZHAO Feng, YU De-shui, PENG Qi-xian, et al. Research on flyer acceleration of divergent detonation of insensitive explosive [J]. *Chinese Journal of Energetic Material(Hanneng Cailiao)*, 2011, 19(5): 527-531.
- [13] 刘丹阳,陈朗,杨坤,等.CL-20基炸药爆轰产物JWL状态方程实验标定方法研究[J].兵工学报,2016(增刊1):141-145.  
LIU Dan-yang, CHEN Lang, YANG Kun, et al. Calibration method of parameters in JWL equation of state for detonation products of CL-20-based explosives [J]. *Acta Armamentarii*, 2016(suppl.1): 141-145.
- [14] 杨晨琛,李晓杰,闫鸿浩,等.爆轰产物状态方程的水下爆炸反演理论研究[J].爆炸与冲击,2019,39(9):092201.  
YANG Chen-chen, LI Xiao-jie, YAN Hong-hao, et al. An inverse method for the equation of state of detonation products from underwater explosion tests [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(9): 092201.
- [15] 李科斌,董新龙,李晓杰,等.水下爆炸实验法在工业炸药JWL状态方程测定中的应用研究[J].兵工学报,2020,41(3):488-494.  
LI Ke-bin, DONG Xin-long, LI Xiao-jie, et al. Research on parameters determination of JWL EOS for commercial explosives based on underwater explosion test [J]. *Acta Armamentarii*, 2020, 41(3): 488-494.
- [16] 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.
- [17] YANG Y, DUAN Z, LI S, et al. Evaluation of the detonation characteristics of aluminized DNAN-based melt-cast explosive by the detonation cylinder test [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2023, 47(4).
- [18] LI X, PEI H, ZHANG X, et al. Effect of aluminum particle size on the performance of aluminized explosives [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2020, 45: 807-813.
- [19] 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.
- [20] 宋浦,杨凯,梁安定,等.国内外TNT炸药的JWL状态方程及其能量释放差异分析[J].火炸药学报,2013,36(2):42-45.  
SONG Pu, YANG Kai, LIANG An-ding, et al. Difference analysis on JWL-EOS energy release of different TNT charge [J]. *Chinese Journal of Explosive & Propellants*, 2013, 36(2): 42-45.
- [21] LEE E L, HORNIG H C, KURY J W. Adiabatic expansion of high explosive detonation products UCRL-50422 [R]. GA: Lawrence Livermore National Laboratory, 1968.
- [22] REAUGH J E, SOUERS P C. A constant-density Gurney approach to the cylinder test [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2004, 29(2): 124-128.
- [23] SOUERS P C, GARZA R, HORNIG H, et al. Metal angle correction in the cylinder test [J]. *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*, 2011, 36(1): 9-15.

- [24] 崔浩,郭锐,顾晓辉,等. BP神经网络和圆筒能量模型标定炸药JWL的参数[J]. 火炸药学报, 2021, 44(5): 665-673.  
CUI Hao, GUO Rui, GU Xiao-hui, et al. Calibration of JWL parameters of explosive by BP neural network and cylinder energy model [J]. *Chinese Journal of Explosive & Propellants*, 2021, 44(5): 665-673.
- [25] STEINBERG D J, COCHRAN S G, GUINAN M W. A constitutive model for metals applicable at high-strain rate [J]. *Journal of Applied Physics*, 1980, 51(3): 1498-1533.
- [26] MEYERS M A. Dynamic behavior of materials[M]. New York: John Wiley & Sons, 1994.
- [27] Century Dynamics Inc. AUTODYN material library, Version 17.0 [DB]. Los Angeles, California: Century Dynamics Inc, 2016.

## Probe Cylinder Test Method and Calibration of JWL Equation of State of Detonation Products for TNT Explosive

CUI Hao<sup>1</sup>, WU Jun-an<sup>1</sup>, ZHOU Hao<sup>2</sup>, YANG Yong-liang<sup>1</sup>, XING Bo-yang<sup>3</sup>, CHEN Xiong<sup>1</sup>, GUO Rui<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. National Special Superfine Powder Engineering Research Center, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 3. Sichuan Aerospace System Engineering Institute, Chengdu 610100, China)

**Abstract:** The cylinder test is one of the most commonly used tests to calibrate the parameters of the equation of state for explosive detonation products. A probe cylinder test platform was designed and established in order to determine the parameters of the JWL equation of state for explosive detonation products. A 20 ns high-resolution pulse chronograph and a set of probes with radial displacement differences were used to record multiple discrete points during the expansion process of the cylinder. When the cylinder expands to the head of the probe to form a circuit loop, the pulse chronometer records the time. Based on this, the displacement-time history curve of the cylinder wall can be obtained. Two probe cylinder tests of TNT explosives were carried out, and discrete points of cylinder expansion displacement were obtained. The experimental results show that the difference between the two sets of test curves is small, indicating that the probe cylinder test has good repeatability. The JWL equation of state parameters of TNT explosive detonation products were determined using the BP-GA algorithm. The determined JWL parameters were then substituted into the finite element software for numerical verification, and the results showed that the determination coefficient  $R^2$  of the simulation displacement curve was 0.9997, indicating the high accuracy of JWL parameters.

**Key words:** probe cylinder test; pulse chronograph; JWL equation of state; TNT explosive

**CLC number:** TJ55; O389

**Document code:** A

**DOI:** 10.11943/CJEM2023066

**Grant support:** National Natural Science Foundation of China (Nos. 12202200, 11972197 and 21875109) and China Postdoctoral Science Foundation (No. 2022M711641)

(责编:高毅)