

高能炸药拉伸应力-应变曲线 测定方法的研究

马丽莲

(中国工程物理研究院化工材料研究所)

摘要 本文介绍了利用粘结拉伸法和球形夹具拉伸法测定 JO-9159 在不同的应变速率、不同温度及不同加载历程下的拉伸应力-应变曲线,同时给出 TNT/RDX (40/60) 在不同横梁速度及不同温度下的拉伸应力-应变曲线。根据塑性力学理论,对所测出的各条曲线的数据通过拟合处理,导出含有一定物理意义的数学模型。

关键词 高能炸药 应力-应变曲线

1 引言

70年代中期,Johnson等人^[1~3]先后报导了利用试样两端粘接“粘接帽”的方法,测定了RX-03-BB、RX-04-EE、PBXW-113等炸药的拉伸应力-应变曲线。在1980年初Glen介绍了取消粘结帽,设计了一种哑铃形试样及一个锥形机械夹紧装置^[4]。他们利用这种试样及两个锥形夹具装置,测量了以HMX及TATB为基的炸药拉伸应力-应变曲线,出现试样过早断在夹具内的现象,分析认为试样设计是关键。1984年,他们为了解决上述问题付出了昂贵的费用,利用有限单元法对百种以TATB为基的高能炸药配方的试样进行了计算和设计,从中找出哑铃形试样最佳的圆弧过渡半径、锥角,并通过这些最佳数据,计算出应力集中系数大约是1.04。按该试样设计相应的夹具,才获得了较满意的测试结果。

上述文献报导的炸药拉伸应力-应变曲线的测定方法,其关键在于试样尺寸及形状的确定。我们研究炸药的拉伸应力-应变曲线是在1979~1981年之间进行的。首先是从试样尺寸及形状的设计开始,结合我国的试验设备能力及研制的塑料粘结炸药的材质,从被测物的力学性能分析,发现几种炸药(同一主体炸药)的弹性模量比美国所研制的塑料粘结炸药高出1~2倍,其力学性能在常温下是脆性的,而且拉伸强度只有抗压强度的十分之一。其次从设备分析,现行国产的材料试验机适用于金属及一般非金属材料力学性能测定,这些材料对试验机上下夹具的同轴度没有明确的要求。若用它测定炸药的拉伸应力-应变曲线,需要对试验机及上下夹具的同轴度提出较严的要求,同时必须在工艺装配及测定步骤上采取一定的措施。尤其对于炸药这种较脆的变形量小的材料,要配用高分辨率的双侧伸长计来完成测定。而国产材料试验机一般未配备上述伸长计,所需伸长计一般是在订购时由供应单位按其特殊的要求而提供的。综上所述,我们只能从现有设备能力及材料

的特殊性来研究试样尺寸及测试手段,我们现行的试样经过有限单元法计算应力集中系数为1.06,并且利用球形夹具和粘结拉伸的方法。

在测试条件上,与国外报导的亦有差别。我们规定横梁的速度为0.2mm/min,而国外为0.12mm/min。标距大小由塑料粘结炸药的配比而定,美国一般采用24mm左右,我们一般采用50mm。对于数据的处理,我们对硬质塑料粘结炸药采用了改进的Ramberg-Osgood模型,它能反映出炸药试样加载规律,并且有三个特性参数代表炸药应力-应变曲线的特性。

本文主要介绍了研究JO-9159^[5]及TNT/RDX 40/60两种炸药的拉伸应力-应变曲线的测定方法及所得的结果。

经近十年的实践证明,该法基本上能适用于各种塑料粘结炸药及其它固体炸药的应力-应变曲线的测定。

测定的高能炸药的拉伸应力-应变曲线表明它在室温下纯属脆性材料。当温度升高,其力学性能和所有高聚物材料一样,属于粘弹性材料,反映出它明显地依赖于温度和外力作用的时间(横梁速度或应变速率)。大量的试验结果表明:炸药应力-应变曲线组合了固体的弹性和液体的粘性两者的特性,因而可以应用线性粘弹的理论来研究高能炸药的力学性能。

2 试验原理和试验装置

2.1 试验原理

炸药的标准拉伸试样或经粘结的试样,置于材料试验机上下粘结拉伸夹具或球形拉伸夹具之间,并在试样的等截面处卡上双侧伸长计,在一定的应变速率或横梁速度下,施加单轴拉力,同时试样在等截面区间产生相应的变形,直至破坏为止,由X-Y函数记录仪和数据采集系统,分别描绘一条应力-应变曲线和采集力-形变的数据。以上数据输入计算机内处理,最后获得一条拉伸应力-应变曲线和拉伸模量及拟合参数。

2.2 试验装置

在材料试验机的框架上安装试验装置,如图1所示。

2.3 炸药试样尺寸与质量要求

2.3.1 试样尺寸

如图2所示^[6]。

2.3.2 质量要求

早在60年代初,为了较准确地反映炸药试样的力学性能,要求试件在机械加工之前,须经X光检验,以了解其内部质量(如有无气孔、缩孔、裂纹和金属杂质等疵病);还需进行密度测定,选取密度差较小的作为试样。在测试前,亦应经外观检查,表面应平整、无裂纹、裂缝和加工缺陷;对浇注件应无气孔、缩孔、裂纹等疵病;若被测材料具有各向异性,应沿纵横方向分别取样,且同组试样方向要一致。

近来,Wiegand等人介绍了Composition B的压缩应力-应变曲线随浇注工艺条件、黑索今颗粒粗细和组分而变化,还明确指出试样须经X光照片检测其内部质量的必要性^[7]。

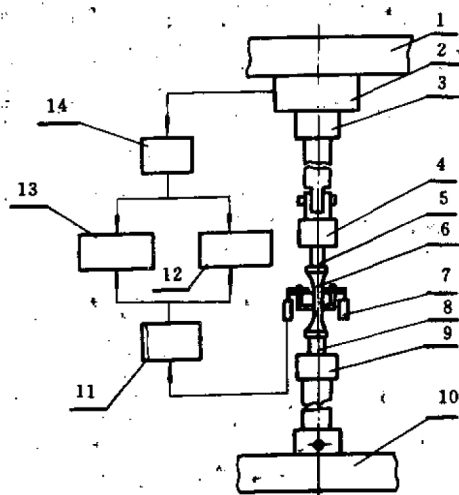


Fig. 1 Experimental setup

- 1—Frame,
- 2—Load cell,
- 3—Rotating joint,
- 4—Up adhere grip,
- 5—Up adhere cap,
- 6—Explosive specimen,
- 7—Extensometer,
- 8—Down adhere cap,
- 9—Down adhere grip,
- 10—Crosshead,
- 11—Strain amplifier,
- 12—X-Y function plotter,
- 13—Data collection system,
- 14—Load amplifier.

图 1 试验装置

- 1—主机框架；2—负荷传感器；3—旋转结头；4—上粘接夹具；5—上粘接帽；
- 6—炸药试样；7—伸长计；8—下粘接帽；9—下粘接夹具；10—横梁；
- 11—形变放大器；12—X-Y记录仪；13—数据采集系统；14—负荷放大器。

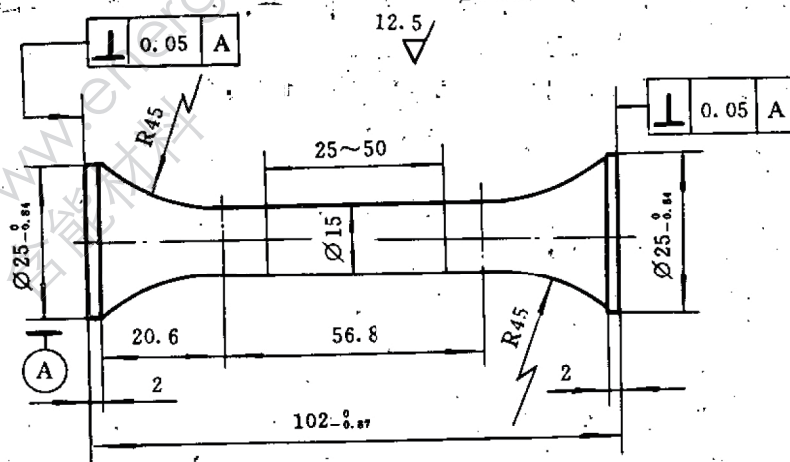


图 2 炸药试样

Fig. 2 Explosive specimen

3 拉伸应力-应变曲线的数学模型及数据处理

根据王红、徐秉业等著作所阐述的塑性的拉伸应力-应变曲线的数学模型^[8,9],可用下式描述:

$$\epsilon = \frac{\epsilon_m \sigma}{\sigma_m} + A_m \epsilon_m \left(\frac{\sigma}{\sigma_m} \right)^m \quad (1)$$

式中: ϵ ——应变; σ_m ——待定拟合系数, Pa; ϵ_m , A_m , m ——待定拟合系数; σ ——应力, Pa。

上式中各系数可以由回归迭代求出, 以下计算结果表明, 该数学模型基本适合现在所研制的各种高能炸药在任何环境温度下拉伸应力-应变曲线的计算。

(1)式虽然能使炸药的拉伸应力-应变曲线的计算值和试验值相吻合, 但表达式中的各项系数对炸药而言, 其物理意义不够明确, 因此由(1)式改为(2)式。

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + A \sigma^m \quad (2)$$

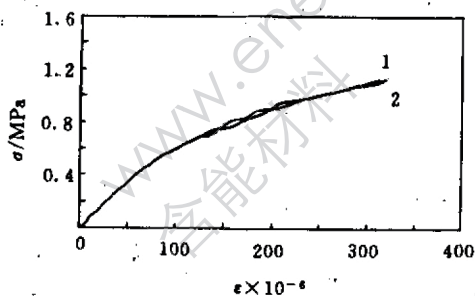
式中: E ——炸药的弹性模量, Pa; A ——待定系数。

对 TNT/RDX 言, 按上述两式算出的拟合系数, 见表 1 及图 3, 相关系数为 0.993。

表 1 TNT/RDX (40/60) 拟合系数

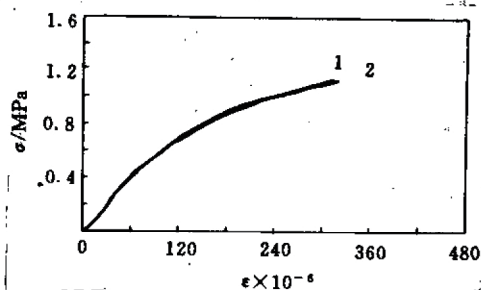
Table 1 Fitted coefficients of TNT/RDX (40/60)

系 数	按(1)式	按(2)式
σ_m/MPa	0.167	—
ϵ_m	1.1897×10^{-6}	—
A_m	4.36×10^{-3}	—
A/MPa^{-m}	—	1.388×10^{-4}
m	2.862	2.862
E/GPa	—	8.80



(a) (1)式回归曲线

(a) Regression curve of equation (1)



(b) (2)式回归曲线

(b) Regression curve of equation (2)

图 3 TNT/RDX (40/60) 在 15℃ 下的拉伸应力-应变曲线

1——计算值; 2——实测值

Fig. 3 Tensile stress-strain curves of TNT/RDX (40/60) at 15℃

1——Calculated values, 2——Experimental values.

由图 3 可知, TNT/RDX (40/60) 的应力-应变曲线, 不论按(1)式按(2)计算, 其实测值与计算值均有良好的一致性。

4 试验结果

4.1 JO-9159 在不同温度及应变速率下拉伸应力-应变曲线

JO-9159 是以 HMX 为基的塑料粘结炸药配方的代号,其组分为 HMX/粘结剂/钝感剂(95/4.7/0.3)。

对 JO-9159 的拉伸强度而言,温度若在 $-10\sim 15^{\circ}\text{C}$ 之间,拉伸强度值变化不大。若高于 15°C ,其值逐渐下降(如图 4)。

对 JO-9159 的拉伸应力-应变曲线而言,在给定的范围内,提高应变速率,其曲线变化很小(见图 5),但随温度的升高而明显地依次下移,如图 6 所示。

若将 JO-9159 在不同温度下测得的应力-应变值,代入前述的(1)式中,则得出表 2 中各拟合系数。由此可知,其割线模量亦随温度升高而逐渐减小,与图 5 所示相吻合。

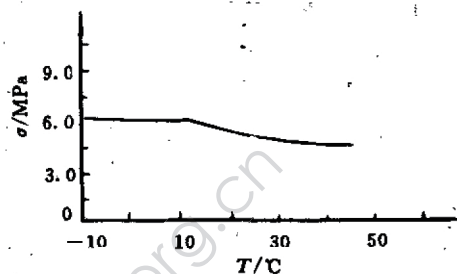


图 4 JO-9159 拉伸强度与温度曲线

Fig. 4 Curve of tensile strength vs temperature of JO-9159

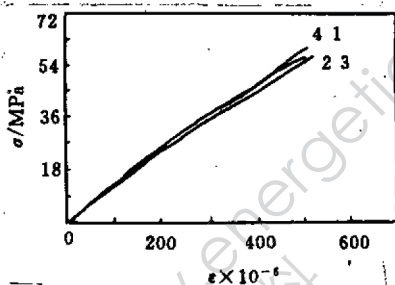


图 5 JO-9159 在不同应变速率下的拉伸应力-应变曲线

Fig. 5 Tensile stress-strain curves of JO-9159 at different strain rate

1— $5 \times 10^{-5} \text{min}^{-1}$; 2— $3.75 \times 10^{-4} \text{min}^{-1}$; 3— $10 \times 10^{-4} \text{min}^{-1}$; 4— $7.5 \times 10^{-3} \text{min}^{-1}$ 。

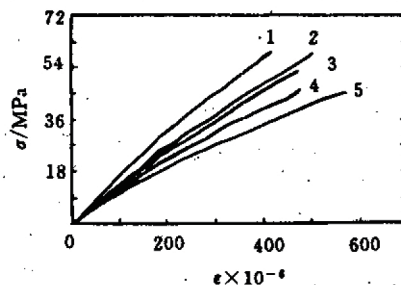


图 6 JO-9159 在不同温度下的拉伸应力-应变曲线

Fig. 6 Tensile stress-strain curves of JO-9159 at different temperature

1— -10°C ; 2— 10°C ; 3— 20°C ; 4— 35°C ; 5— 45°C 。

表 2 JO-9159 在不同温度下拟合系数

Table 2 Equation parameters of JO-9159 at different temperature

温度/ $^{\circ}\text{C}$	E_m/GPa	σ_m/MPa	$\epsilon_m \times 10^{-3}$	m	$s \times 10^{-4}$
-10	17.89	0.98	54.47	2.031	± 1.389
10	14.45	0.77	53.46	1.867	± 1.541
20	12.73	1.94	152.41	2.304	± 3.468
35	11.24	2.05	182.69	2.800	± 2.12
45	10.72	0.73	68.31	2.212	± 2.029

注: E_m 是炸药弹性模量下降到 95~98% 的割线模量。

4.2 不同加载历程对拉伸应力-应变的影响

不同加载历程,对 JO-9159 的拉伸应力-应变曲线有不同程度的影响。

当加载-卸载在 $30\sigma_s\%$ 以下时,其曲线的斜率略有变化,但仍服从虎克定律,呈直线或接近于直线(见图 7、图 8)。

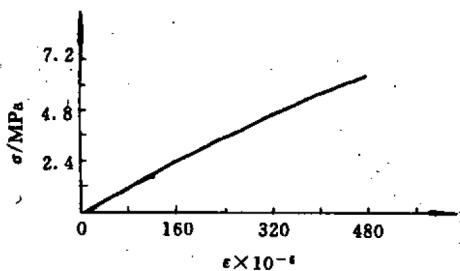


图 7 JO-9159 $20\sigma_s\%$ 加载-卸载
拉伸应力-应变曲线

Fig. 7 $20\sigma_s\%$ Load-unload tensile
stress-strain curves of JO-9159

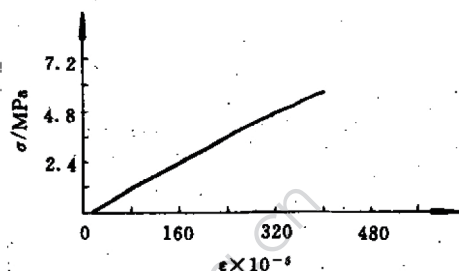


图 8 JO-9159 $30\sigma_s\%$ 加载-卸载
拉伸应力-应变曲线

Fig. 8 $30\sigma_s\%$ Load-unload tensile
stress-strain curves of JO-9159

当加载 $50\sigma_s\%$ 时,再卸载,便出现残余形变,并随加载-卸载历程的升高而增大如图 9、图 10 所示。

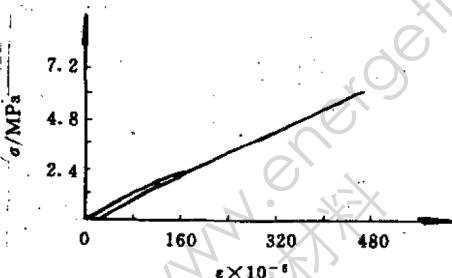


图 9 JO-9159 $50\sigma_s\%$ 加载-卸载
拉伸应力-应变曲线

Fig. 9 $50\sigma_s\%$ Load-unload tensile
stress-strain curves of JO-9159

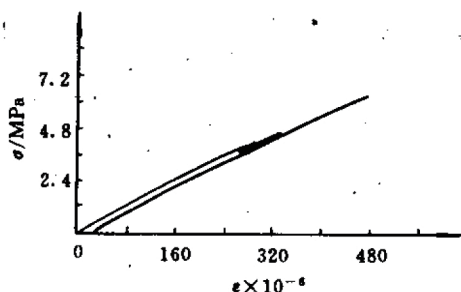


图 10 JO-9159 $70\sigma_s\%$ 加载-卸载
拉伸应力-应变曲线

Fig. 10 $70\sigma_s\%$ Load-unload tensile
stress-strain curves of JO-9159

至于加载-卸载历程在 $30\sim 50\sigma_s\%$ 之间,何时才开始出现残余形变,尚未研究。不过,在我们的实际工作中,加载-卸载历程常采用 $20\sigma_s\%$ 。

4.3 TNT/RDX (40/60) 在不同的温度和不同的横梁速度下的拉伸应力-应变曲线

TNT/RDX (40/60) 属脆性材料,试样内部质量的均匀性,不像 JO-9159 试样致密均匀,易受工艺过程的影响,加之试样在机械加工或测试中,出现误差稍有偏大的情况,可能导致出现反常的现象,但总的趋势还是有规律的。如表 3 中割线模量 E_s ,随着温度升高,其值逐渐降低的规律,但在图 11 中的线 1 与线 2 则出现反常,即是一例。

对 TNT/RDX (40/60) 的拉伸应力-应变曲线而言, 随着横梁速度的加快, 其曲线的初始段变化不大。当应变率高于 8×10^{-4} 时, 其应力值逐渐升高, 且越往后越明显增高, 如图 12 所示。

表 3 TNT/RDX (40/60) 在不同温度下拟合系数

Table 3 Fitted coefficients of TNT/RDX (40/60) at different temperature

温度/℃	E_a /GPa	A	m	R	$s \times 10^{-6}$
10	10.89	0.0436	1.897	0.996	± 5
15	10.784	0.0436	1.934	0.997	± 5
20	10.311	0.0436	1.750	0.997	± 5
25	9.825	0.0436	2.586	0.989	± 8
30	7.706	0.0436	2.295	0.989	± 11

注: 1) 表中各系数是按(2)式计算的结果;

2) R 为相关系数, s 为方差。

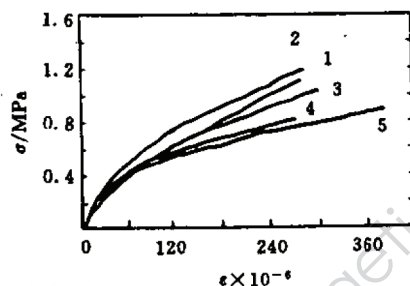


图 11 TNT/RDX (40/60) 在不同温度下的拉伸应力-应变曲线

1—10℃; 2—15℃; 3—20℃;
4—25℃; 5—30℃。

Fig. 11 Tensile stress-strain curves of TNT/RDX (40/60) at different temperature

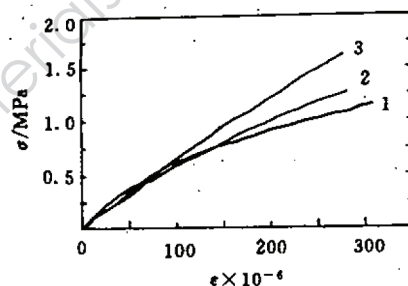


图 12 TNT/RDX (40/60) 在不同横梁速率下的拉伸应力-应变曲线

1—0.5mm/min; 2—1mm/min;
3—2.5mm/min。

Fig. 12 Tensile stress-strain curves of TNT/RDX (40/60) at different strain rate

5 结论

5.1 在研究炸药的球形夹具及粘结拉伸应力-应变曲线测试方法的同时, 对形变的测量仪器也进行了多方面的研究, 先后经历了十余年的实践, 认为此测试方法可靠, 数据可信。

5.2 炸药的拉伸应力-应变曲线与压缩应力-应变曲线有所不同, 它们之间不能互相代替, 在相同的条件下拉伸应力-应变曲线比压缩应力-应变曲线表现出炸药具有明显的脆性。

5.3 炸药的拉伸应力-应变曲线, 可以应用线性粘弹性理论, 经过大量试验数据回归运算, 得出具有一定物理意义的数学模型。

5.4 炸药的拉伸应力-应变曲线上符合弹性模量的部分, 大约只有 20%, 这就是初始模量的定义。当加载-卸载超过 30% 时, 炸药拉伸应力-应变曲线与加载的历程有关。

5.5 炸药拉伸应力-应变曲线显著地取决于温度, 它和横梁速度、应变速率都有一定程度的关系。

韩敦信、阮庆云、李银成等同志在应力-应变曲线数学模型的改进方面给予了帮助和指导, 在此谨致谢意!

参 考 文 献

- 1 Johnson H D. The Effects of Thermal Age to The Mechanical Properties of RX-03-BB. MHSMP-76-15B, 1976.
- 2 Johnson H D. Mechanical Properties of Explosive. MHSMP-74-10B, 1974.
- 3 Glen W N. End Cap Development for Multi-Temperature Tensile Testing of Small TATB Specimen. MHSMP-78-69, 1978.
- 4 Glen W N. Evaluation of End-Cap-Less Tensile Specimen for Explosive Testing. MHSMP-84-36, 1984.
- 5 董海山, 周芬芬主编. 高能炸药及相关物性能. 北京: 科学出版社, 1989.
- 6 GJB 772. 105-89 炸药试验方法: 抗拉强度的测定.
- 7 Wiegand D A, Pinto J. The Mechanical Response of TNT and a Composite, Composition B, of TNT and RDX to Compressive Stress; II Dependence on Processing and Composition. J. Energetic Materials, 1991, 9(5): 349~414
- 8 王 红, 黄文彬著. 塑性力学引论. 北京: 北京大学出版社, 1982.
- 9 徐秉业, 陈森灿著. 塑性理论简明教材. 北京: 清华大学出版社, 1981.

STUDY ON DETERMINING TENSILE STRESS-STRAIN CURVES OF HIGH EXPLOSIVES

Ma Lillian

(Institute of Chemical Materials, CAEP)

ABSTRACT The tensile stress-strain curves of explosive JO-9159 were determined by using the method of adherence-tension and globe-grip tension at different rate, temperature and loading course. The tensile stress-strain curves of TNT/RDX 40/60 at different crosshead rate and temperature were given as well. The data from every curve were fitted according to the plasticity theory and derivated the mathematic model showing definite physical meaning.

KEY WORDS high explosive, stress-strain curve.