

# 高能材料动态力学性能的研究

韩小平 张元冲 沈亚鹏

(西安交通大学 西安 710049)

张泰华 赵壮华

(西安近代化学研究所 西安 710061)

**摘要** 采用自制的高能材料动静态变温三轴、单轴压缩试验装置、在熔点以下温度,以及在中等应变速率( $2\sim 4/s$ )和准静态( $3\times 10^{-3}/s$ )条件下测试了 TNT 材料三轴、单轴压缩力学性能参数。试验结果表明, TNT 材料具有明显的应变率相关和热软化效应。在单轴压缩条件下, TNT 材料是脆性破坏,断裂强度小于屈服极限;在三轴压缩条件下,试件有较大的塑性变形。根据试验结果拟合了 TNT 材料随着加载速率和环境温度变化的本构关系,分析表明该本构关系可以很好地描述材料的应变率、温度效应。

**关键词** 三轴压缩试验 高能材料 应变率相关 热软化效应 本构关系

**中图分类号** TQ 564.3,4

## 1 前言

炸药装药在加工、储存、运输和使用(如实弹发射等)条件下,由于温度变化和受冲击作用等,可能会引起早爆。炸药装药是否会发生早爆取决于炸药装药本身在力、热耦合作用下能否产生足够的高温热点,而热点的产生与炸药装药性能以及装药在各种条件下所经受的外界机械载荷有关,这就需要充分研究炸药装药在各种复杂条件下的力学、物理、化学特性。

八十年代以来,美国利弗莫尔实验室,英国剑桥卡文迪什实验室以及美国陆军所属的研究机构对炸药受到外界的刺激,特别是在冲击载荷作用下产生局部高温点而引爆的力学、物理、化学机理进行了广泛的实验研究和理论分析。J. Pinto, S. Nicolaides 和 D. A. Weigand<sup>[1,2,3]</sup>对复合炸药 Comp. B 和单质炸药 TNT,在准静态和高应变速率以及不同温度下,分别测定了单轴、三轴压缩条件下各种力学参数,讨论了温度、加载速率对这些参数的影响,并采用可能的机械破坏机理分析了试验结果。

我国在近几年已建立了炸药在准静态单向拉伸、压缩以及剪切条件下基本力学性能的测试方法<sup>[4,5]</sup>,这为武器结构中炸药部件的设计,提供了部分重要的力学参数。但实际应用中,结构或部件往往处于动态和一定的温度环境中,多数情况下炸药部件周围有壳体约束,因此单轴加载条件下的静态力学性能实验已不能满足当今的设计要求。设计在复杂应力状态下炸药的动态力学实验,以及建立炸药的动态本构关系,对于研究炸药早爆的热点

形成机理,进行理论分析和数值计算有着重要的意义。

我们采用自制的高能材料动静态变温三轴、单轴压缩试验装置,在熔点以下温度,以及在中等应变速率( $2\sim 4/s$ )和准静态( $3\times 10^{-3}/s$ )条件下测试了 TNT 材料三轴、单轴压缩力学性能参数。试验结果表明,TNT 材料具有明显的应变率相关和热软化效应。在单轴压缩条件下,TNT 材料是脆性破坏,断裂强度小于屈服极限;在三轴压缩条件下,试件有较大的塑性变形。根据试验结果拟合了 TNT 材料随着加载速率和环境温度变化的本构关系,分析表明该本构关系可以很好地描述材料的应变率、温度效应。这套试验装置以及三轴压缩应力状态下力学参数的测试、分析处理系统,为研究高能材料的力学性能提供了一套完整的技术和手段。本文建立的 TNT 材料本构关系为研究炸药早爆的热点形成机理,进行理论分析和数值计算,提供了一个基本依据。

## 2 试验方法

三轴压缩试验装置的结构示意图见图 1,它主要由以下几部分组成:(1)轴向加压系统;(2)高能材料三轴压缩环境室;(3)加热恒温系统;(4)数据测量采集记录系统。

采用 MTS800-10 材料试验机提供轴向压力,通过计算机加载速率控制曲线实现应变速率的控制。

三轴压缩环境室是该装置的核心部分,见图 2、[2(b)为局部放大]。其中厚壁钢套和安全罩用淬火热钢制成,可耐高温高压,以保障试验的安全。上、下托盘是为了保证试件的对中以及支承钢套。

三轴压缩环境室区别于其它常规三轴室的重要特点是:(1)不需要对试件施加围压;(2)采用淬火热钢制成厚壁钢套和安全罩;可以保证高能材料在高温高应变速率下加载的安全性;(3)高能材料的熔点较低,如 TNT 的熔点为  $82.5^{\circ}\text{C}$ ,升温后材料极易软化,难以在

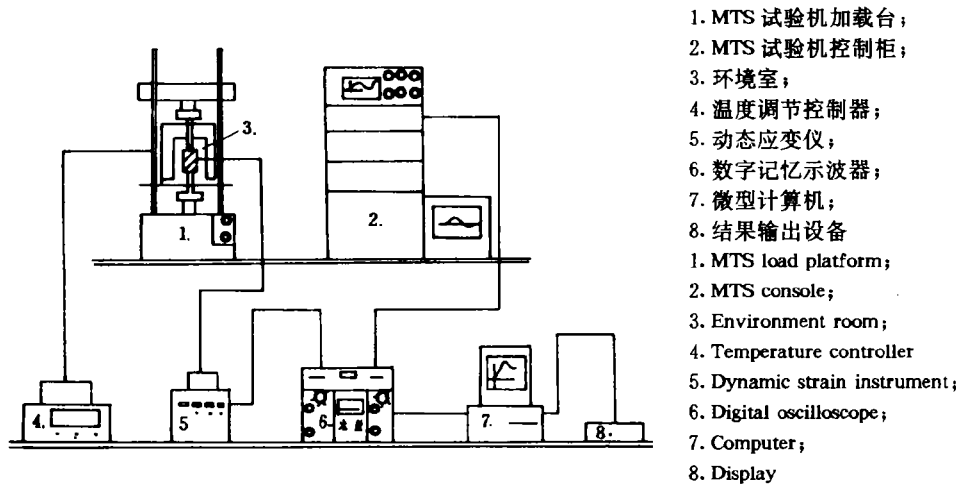
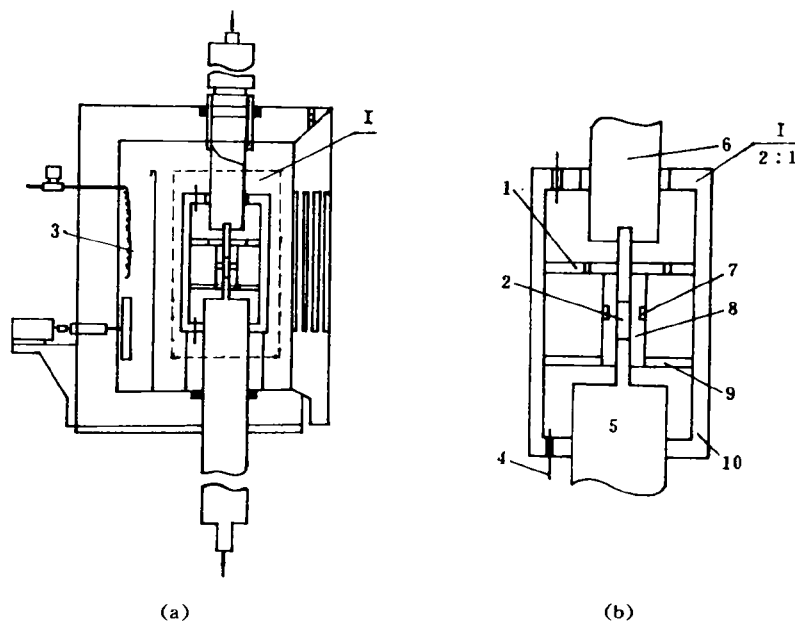


图 1 高能材料三轴压缩试验装置示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of the experiment set-up



- (a) (b)
1. 上托盘; 2. 试件; 3. 热电阻丝; 4. 热电偶; 5. 下加载杆; 6. 上加载杆;  
7. 应变片; 8. 厚壁钢套; 9. 下托盘; 10. 安全罩
1. Upper tray; 2. Specimen; 3. Resistance; 4. Thermocouple; 5. Lower load cell; 6. Upper load cell;  
7. Strain gage; 8. Steel cylinder; 9. Lower tray; 10. Safety cover

图 2 高能材料三轴压缩环境室

Fig. 2 Environment room of triaxial compression

常规三轴室进行温度试验,而本文介绍的三轴压缩环境室可以不受材料热软化的影响。

加热恒温系统由恒温室、温度调节控制器、 $BA_2$  热电偶、直读温度计等部分组成。

数据测量采集记录系统用来测量载荷、位移、应变、时间等信号。它由位移传感器、载荷传感器、应变敏感元件(双侧引伸计或者应变片)、动态应变仪、数字记忆示波器等部分组成。

试验材料选用国产 TNT。试件制作过程如下:将熔融的 TNT 注入圆柱形金属组合模中,振动除气,抽真空冷却。将铸件切割加工到所需要的尺寸和精度。用无损探伤检查,去除有显著裂纹或空洞的试件。

试件直径 19.1mm,长度 38.1mm,密度为  $1.616\text{g}/\text{cm}^3$ 。

试验时,在试件表面涂以石墨粉后放入钢套内孔中,以减小摩擦力。在加载前升初温,使圆柱形试件侧面与钢套内壁表面接触,这可由动态应变仪显示的钢套外壁的环向应变值来确定。

进行温度试验时,先将试件预热到所需要的温度,然后在表面涂上石墨粉放入钢套内孔中。在钢套外壁连接热电偶,保温一段时间,当所有热电偶达到热平衡时开始进行试验。

在三轴压缩装置中去掉钢套和上、下托盘,在上、下加载杆端分别放置上、下压头,就构成单轴压缩试验装置,上、下压头表面应加工到所要求的精度以减少摩擦力,并划上同

心圆以保证试件对中。用双侧引伸计或直接在试件标距内贴应变片测量应变。

### 3 试验结果与讨论

利用上述试验装置以及力学参数的测试、分析、处理系统,对单质炸药 TNT,在室温、35℃、50℃三种温度下,分别采用准静态( $3 \times 10^{-3}/s$ )和中等应变速率( $2 \sim 4/s$ ),进行了三轴、单轴压缩试验。

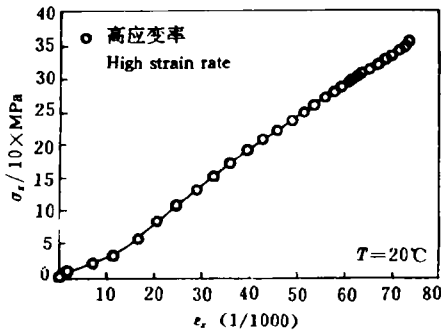


图 3 TNT 三轴压缩  $\sigma_r$ - $\epsilon_r$  曲线  
Fig. 3 Typical triaxial stress versus strain curve

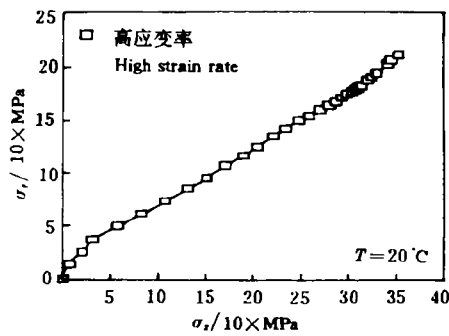
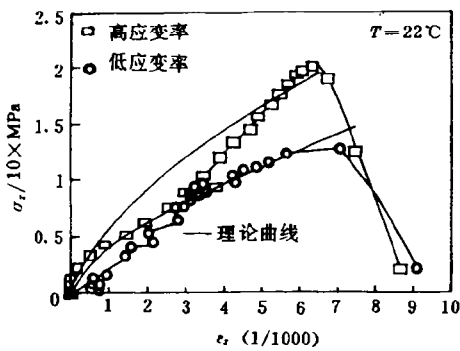
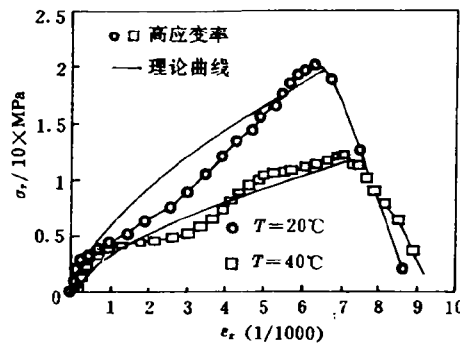


图 4 TNT 三轴压缩  $\sigma_r$ - $\sigma_a$  曲线  
Fig. 4 Typical triaxial radial stress  $\sigma_r$  versus axial stress  $\sigma_a$  curve



□ High strain rate,  
○ Low strain rate,  
--- Theory curve.

图 5 不同应变率下的  $\sigma_m$ - $\epsilon_r$  曲线  
Fig. 5 Typical uniaxial stress-strain curve at low and high strain rate



○ □ High strain rate,  
--- Theory curve.

图 6 不同温度下的  $\sigma_m$ - $\epsilon_r$  曲线  
Fig. 6 Typical uniaxial stress-strain curve at different temperature

典型的 TNT 三轴压缩  $\sigma_r$ - $\epsilon_r$ (轴向应力-轴向应变)曲线和  $\sigma_r$ - $\sigma_a$ (径向应力-轴向应力)曲线见图 3、图 4。

图 5、图 6 给出 TNT 单轴压缩  $\sigma_r-\varepsilon_r$  (断裂强度-应变) 曲线。

表 1、表 2 分别给出在三种温度、两种应变速率条件下 TNT 的泊松比  $\nu$ 、杨氏模量  $E$ 、屈服极限  $\gamma$  和断裂强度  $\sigma_m$ 。三轴压缩条件下各力学参数的计算公式见文献[2]。

三轴压缩和单轴压缩的试验结果表明:(1) TNT 材料在单轴压缩条件下是脆性破坏, 断裂强度小于屈服极限;(2) 单轴压缩结果给出, 断裂强度、杨氏模量随应变速率提高而上升, 随温度升高而显著降低, 材料具有明显的应变率相关和热软化效应;(3) 泊松比  $\nu$  基本上不受温度、加载速率改变的影响;(4) 在高应变速率加载条件下, 三轴压缩试验测得的杨氏模量、屈服极限, 随着温度升高有降低的趋势。但在低应变速率加载条件下所测得的数据较分散, 这可能是计算公式中没有考虑摩擦影响所致;(5) 在室温、高应变速率条件下, 三轴压缩试验所测得的杨氏模量和单轴压缩试验结果很接近, 说明在这种情形不考虑摩擦影响是合理的。

表 1 TNT 单轴压缩试验结果

Table 1 Summary of TNT uniaxial compression data

温 度 / C	高 应 变 率		低 应 变 率		
	22	40	22	32	40
断裂强度/ $10 \times \text{MPa}$	$1.96 \pm 0.13$	$1.26 \pm 0.13$	$1.37 \pm 0.25$	$0.74 \pm 0.00$	$0.63 \pm 0.05$
杨氏模量/ $10^3 \times \text{MPa}$	$3.05 \pm 0.02$	$1.88 \pm 0.06$	$2.48 \pm 0.05$	$1.58 \pm 0.00$	$0.77 \pm 0.00$

表 2 TNT 三轴压缩试验结果

Table 2 Summary of TNT triaxial compression data

温 度 / C	高 应 变 率			低 应 变 率	
	21	37	49	36	50
泊 松 比	$0.39 \pm 0.01$	$0.39 \pm 0.03$	$0.44 \pm 0.01$	$0.32 \pm 0.00$	$0.30 \pm 0.01$
屈服极限/ $10 \times \text{MPa}$	$3.85 \pm 0.35$	$4.48 \pm 1.30$	$1.97 \pm 0.47$		
杨氏模量/ $10^3 \times \text{MPa}$	$3.25 \pm 0.08$	$3.09 \pm 0.05$	$1.79 \pm 0.03$	$3.42 \pm 0.00$	$3.30 \pm 0.01$

另外单轴压缩试验结果还表明, 断裂应变随应变率增加而降低, TNT 材料不具有动态韧性特性, 这和金属材料不同。

#### 4 TNT 材料的变形特征

单轴压缩条件下试件的破坏形状见图 7。试件沿轴向呈  $45^\circ$  角方向开裂。但也有试件的破裂面大致与轴向平行, 这可能是试件端部的摩擦力影响所致。

三轴压缩加载条件下, 试件沿轴向缩短, 有较大的塑性变形。当轴向载荷为 5000kg 时, 平均轴向塑性应变大约为 3/100。

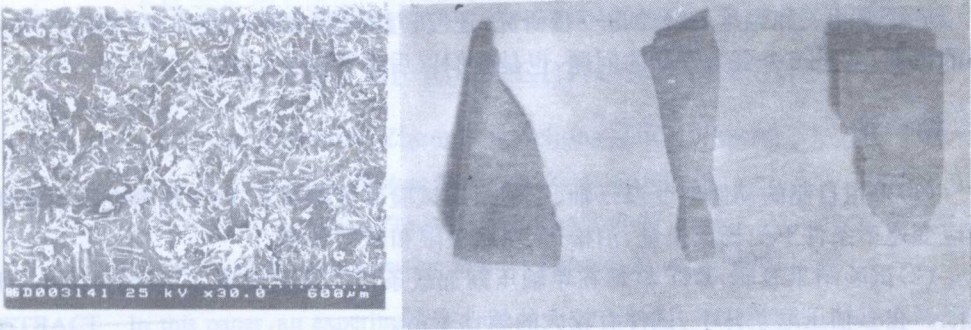


图 7 TNT 试件的原始晶粒形状(a)(扫描电镜,放大倍数 30)和破坏形状(b)

Fig. 7 Typical figures of TNT sample initial crystal (a) and after compression (b)

## 5 本构关系和主要特征

### 5.1 本构关系

由图 5 和图 6 及表 2 给出的试验结果,可以看出 TNT 材料对应变速率和温度均比较敏感。采用 Johnson<sup>[6,7]</sup>提出的热粘塑性本构方程对试验结果进行拟合。这一本构方程的形式为

$$\sigma = (A + Be^n)(1 + C \ln \dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0)[1 - T^{*m}] \quad (1)$$

其中:  $A, B, C, n, m$  是材料常数,  $\dot{\epsilon}_0 = 3 \times 10^{-3} / \text{s}$  为准静态加载时试件的平均应变速率,  $T^*$  是下式定义的无量纲温度:

$$T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \quad (2)$$

其中  $T_r, T_m$  分别为室温和材料的熔化温度。

在单轴压缩下,材料无初应力,取  $A=0$ 。其余的材料常数可由实验确定。 $B$  和  $n$  可由准静态、室温条件下的实验测量值来确定。常数  $C$  和  $m$  可由高应变率、高温下的实验测量值来确定。

所得到的各材料常数:  $A=0, B=341.300 \text{MPa}, C=0.0627, n=0.6461, m=0.7143$ 。

### 5.2 应变率效应

公式(1)中的第一个括号部分的参数  $B$  和  $n$  反映材料的应变硬化特性,第二个括号部分表示应变率的影响。参数  $C$  值的大小反映应变率敏感程度,  $C$  值愈大,材料对应变率愈敏感。

图 5 给出不同应变率下的理论拟合曲线,并和试验曲线进行了比较。

### 5.3 热软化效应

公式(1)中的第三个括号部分表示温度的影响,环境温度  $T$  必须大于室温  $T_r$ 。由于这部分的数值小于 1,因此它反映了较高环境温度所引起的材料的热软化效应。

图 6 给出不同温度下的理论拟合曲线,并和试验曲线进行了比较。

从图 5、图 6 可以看到理论拟合曲线和试验曲线的吻合程度是令人满意的。理论拟合曲线较为准确地描述了 TNT 材料应变硬化、应变率相关以及温度热软化效应。

应变率相关和温度效应的进一步研究,还应讨论试验材料在复杂应力状态下本构关系的拟合,这是一个更为复杂的问题,也是我们以后将要的工作。

## 6 结 论

(1)采用自制的动静态变温三轴、单轴压缩试验装置测试了 TNT 材料在不同温度、不同应变速率条件下的杨氏模量、泊松比、屈服极限和断裂强度。

(2)试验结果表明,TNT 材料在单轴压缩加载条件下是脆性破坏,断裂强度小于屈服极限。在三轴压缩条件下,试件有较大的塑性变形。

(3)TNT 材料具有明显的应变率相关和热软化效应。

(4)采用 Johnson 提出的热粘塑性本构方程对试验数据进行了拟合,结果表明理论拟合曲线与试验曲线吻合良好,该本构方程较为准确地描述了 TNT 材料应变硬化、应变率相关以及温度热软化效应。

## 参 考 文 献

- 1 Weigand D A, Pinto J & Nicolaidis S. The Mechanical Response of TNT and a Composite, Composition B, of TNT and RDX to Compressive Stress; I Uniaxial Stress and Fracture. *J Energetic Materials*, 1991, 9 : 19~80
- 2 Pinto J, Weigand D A. The Mechanical Response of TNT and a Composite, Composition B, of TNT and RDX to Compressive Stress; II Triaxial Stress and Yield. *J Energetic Materials*, 1991, 9 : 205~263
- 3 Weigand D A, Pinto J. The Mechanical Response of TNT and a Composite, Composition B, of TNT and RDX to Compressive Stress; III Dependence on Processing and Composition. *J Energetic Mater.*, 1991, 9 : 349~413
- 4 炸药试验方法:拉伸强度测定法, GJB 772. 105—89, 国防科学技术工业委员会批准
- 5 炸药试验方法:抗剪强度测定法, GJB 772. 107—90, 国防科学技术工业委员会批准
- 6 Batra R C, Kim C H. Effect of Viscoplastic Flow Rules on the Initiation and Growth of Shear Bands of High Strain Rates. *J Mech Phys Solids*, 1990, 38 : 859~866
- 7 Wang Li Li. A Criterion Thermo-Viscoplastic Instability for Adiabatic Shearing. In: *Proc Int Symp on Intense Dynamic Loading and Its Effects*, Beijing, 1986. 787

## AN EXPERIMENTAL STUDY ON DYNAMIC MECHANICAL PROPERTIES OF ENERGETIC MATERIALS

Han Xiaoping, Zhang Yuanchong, Shen Yapeng

(*Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049*)

Zhao Zhuanghua, Zhang Taihua

(*Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an, 710061*)

**ABSTRACT** In this paper, an experimental equipment of triaxial compression is used, Measurements of domestic TNT have been made in triaxial and uniaxial compression as a function of temperature and strain rate. The experimental results show that there exists a clear temperature and strain rate dependence in TNT. Under uniaxial compression TNT failed in a brittle mode and the compression strength is less than the yield strength, and under triaxial compression there obviously exists plastic deformation in the sample. By means the experimental results a constitutive equation is determined. Analysis of the results indicates that by the constitutive equation the strain rate dependence and thermo-softening effect of TNT are described.

**KEY WORDS** triaxial compression, energetic materials, strain rate effect, thermal softening, constitutive equation