

含能材料在低温条件下冲击压缩力学性能的实验研究^{*}

韩小平 张元冲 李 华 沈亚鹏 殷 民

(西安交通大学力学系 西安 710049)

张泰华 赵壮华

(西安近代化学研究所 西安 710061)

摘要 采用自制的含能材料动态变温压缩实验装置,在低温环境下,对国产复合炸药 Comp. B 和单质炸药 TNT 进行了动静态压缩实验,测试了压缩模量、压缩强度等材料性能参数。实验结果表明:在低温条件下,Comp. B 和 TNT 材料具有明显的应变率效应和温度效应,复合炸药 Comp. B 的压缩模量和压缩强度都高于 TNT 炸药,Comp. B 对温度效应更为敏感。还讨论了惯性效应对动态实验波形的影响,通过引入柔度系数,使测试波形趋于光滑。所介绍的实验方法为研究含能材料在低温条件下的冲击压缩性能,提供了一套较完整的技术和手段。

关键词 含能材料 低温环境 应变率效应 温度效应 动态韧性

中图分类号 TQ564.3

1 引言

含能材料被广泛应用在兵器工业和工程爆破中,并且随着应用的深入,其在特种环境下的力学性能日益受到工程界和学术界的关注。80年代以来,美国、英国一些学者对炸药在各种复杂条件下的力学、物理、化学特性进行了实验研究和理论分析。J. Pinto, S. Nicolaides 和 D. A. Weigand^[1,2,3]对复合炸药 Comp. B 和单质炸药 TNT,在准静态和高应变率以及熔点以下的环境温度,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实验结果。但是,迄今还未见到炸药在低温环境下动态加载力学行为研究的文献报道。

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^[4,5]。但是对炸药动态性能研究,开展的工作不多。在文献[6,7]中,我们发表了室温以上温度环境下 TNT 炸药动态力学性能的研究工作。文献[8]采用 Izod 冲击试验机,研究了几种发射药冲击断裂时的形态结构及其断裂破坏机理。

为了获得在低温环境下炸药的动态力学性能参数,进一步探讨低温下炸药的本构关系,以便为复合炸药的研制和安全评估等提供可靠的科学依据和必要参考数据,我们采用自制的含能材料动态变温压缩实验装置,分别在 0℃、-30℃ 低温环境下,对国产复合炸药 Comp. B 和单质炸药 TNT 进行了动静态压缩实验,获得了低温条件下 Comp. B 和 TNT

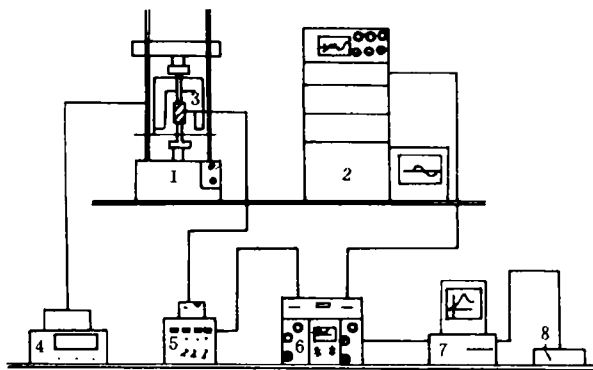
* 西安交通大学机械结构强度及振动国家重点实验室科学基金支持。

1995年1月9日收到原稿,3月1日收到修改稿。

材料的动静态压缩力学性能参数,揭示了在 $10^{-4}/s \sim 10/s$ 应变率范围和低温条件下国产 Comp. B 和 TNT 材料具有明显的应变率效应和温度效应的特性。和 TNT 比较,Comp. B 的压缩强度都有所提高,Comp. B 对温度效应更为敏感。我们介绍的实验方法为研究含能材料在低温条件下的冲击压缩性能,提供了一套较完整的技术和手段。

2 实验装置和实验方法

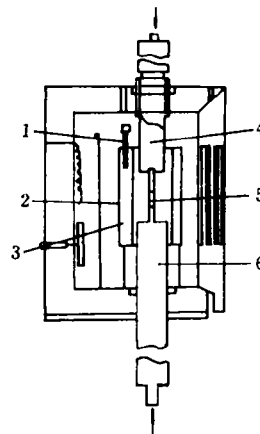
实验装置的示意图见图 1、图 2,主要由 MTS 材料试验机、数字记忆示波器、动态应变仪、恒温环境室、环形低温介质容器、低温测试计等部分组成。



1. MTS 试验机加载台; 2. MTS 试验机控制柜;
3. 环境室; 4. 温度调节控制器;
5. 动态应变仪; 6. 数字记忆示波器;
7. 微型计算机; 8. 结果输出设备
1. MTS load platform; 2. MTS console;
3. Environment room; 4. Temperature controller;
5. Dynamic strain instrument;
6. Digital oscilloscope;
7. Computer; 8. Display

图 1. 含能材料冲击压缩实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental device



1. 感温探头; 2. 制冷容器;
3. 制冷剂; 4. 上加载杆;
5. 试件; 6. 下加载杆
1. Temperature probe;
2. Refrigeration vessel;
3. Refrigerant;
4. Upper load cell;
5. Specimen; 6. Lower load cell

图 2. 低温环境室示意图

Fig. 2 Environment room of low temperature

试件材料分别选用国产 Comp. B 和 TNT。Comp. B 试件制作工艺如下: TNT 在装有搅拌器和蒸气夹套的反应釜中熔化并加热到 100°C , 再缓慢加入湿的 RDX, 继续加热和搅拌直到绝大多数的水分被蒸发, 然后将适量的钝感剂石蜡放入与其它成分一起混合, 搅拌均匀后, 注入圆柱形金属组合模具中除气冷却。将铸件切割加工到所需要的尺寸和精度, 用 X 射线检查, 去除有显著疵病的试件。长度均匀度、平行度公差要求为 $\pm 0.025\text{mm}$, 直径均匀度公差要求为 $\pm 0.015\text{mm}$, 同组试件应在相同工艺条件下生产的铸件上沿同一方向上

切取。试件为圆柱形,直径 19.1mm,长度 38.1mm。Comp. B 的组成:59.5wt%TNT, 39.5wt%RDX, 1wt%Wax。表 1 分别列出国产 TNT 和 Comp. B 炸药的基本物理性质。

表 1 试件材料的基本物理性质
Table 1 Physical nature of the specimen

	密度/(g/cm ³)	熔点/℃	比热/(J/g,℃)
TNT	1.616	82.5	$1.0635+3.14\times 10^{-3}$
Comp. B	1.686	—	$0.980+4.187\times 10^{-3}$

低温环境控制方法 (1)采用液氮降温。将高压氮气瓶中的氮气经减压阀充入盛有液氮的杜瓦瓶,降温后连续不断地导入恒温箱。通过调节减压阀来改变氮气的压力和出口流速,这样可以控制恒温箱内温度的大小。(2)采用干冰、酒精、冰块达到降温。我们采用第二种方法控制低温,具体步骤如下:进行 0℃实验时,先将每个试件用小塑料袋密封,放入冰箱冷藏室预冷 10 小时以上;恒温箱中的环形容器中放入冰块,实验过程中每隔一段时间及时换上新鲜冰块,实测表明恒温箱中温度可保持在 0~2℃。进行-30℃实验时,仍将每个试件用小塑料袋密封,放冰箱冷冻室,调节温度到所需值,预冷 10 小时以上;恒温箱中的环形容器中放入酒精,再放入适量的干冰,用低温测试计量测温度,当达到-30℃时,即可开始进行实验,实测表明,通过控制放入环形容器中干冰的数量可以达到调节温度。

由 MTS880-10 材料试验机提供轴向压力。采用方波加载,频率取为 0.4Hz。

实验时,在试件端部涂以石墨粉后,放入上下压头之间,仔细对中;当低温测试计显示温度达到所需值时,即可开始进行实验。

3 实验结果和讨论

利用上述实验装置对单质炸药 TNT 和复合炸药 Comp. B 在 0℃和-30℃两种温度下,分别采用准静态应变速率(10^{-4} /s)和中等速率(3/s),进行了单轴压缩试验。

图 3~图 6 分别给出 Comp. B 和 TNT 的典型 $\sigma_x-\epsilon_x$ (轴向应力-轴向应变)曲线。

图 7 给出 Comp. B 和 TNT 的 $E-T$ (压缩模量-温度)曲线。

图 8 对 Comp. B 和 TNT 的实验曲线进行了比较。

图 9、图 10 给出应变率的敏感性随着温度的变化情况。其中图 10 的数据引自文献 [6]。

图 11、图 12 在描述了在低温环境下,Comp. B 和 TNT 的动态韧性。

表 2、表 3 分别给出在两种温度、两种应变率条件下 Comp. B 和 TNT 的压缩强度 σ_m 、压缩模量 E 、断裂应变 ϵ_m 。

实验结果表明:(1)Comp. B 和 TNT 材料在低温环境下,单轴压缩强度 σ_m 和压缩模量 E 表现出明显的应变率效应,当应变速率提高时 σ_m 和 E 值增大。(2)在 0℃~-30℃ 温度范围内,Comp. B 和 TNT 材料也表现出敏感的温度效应,当温度降低时, σ_m 和 E 值

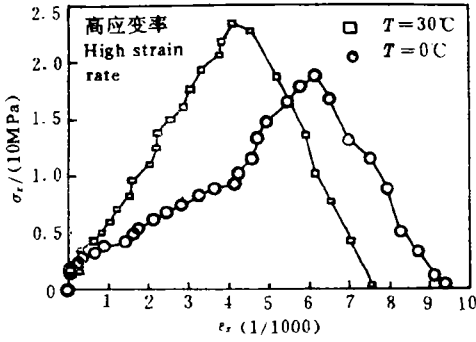


图3 Comp. B 低温实验结果
Fig. 3 Axial stress versus axial strain at high strain rate for Comp. B

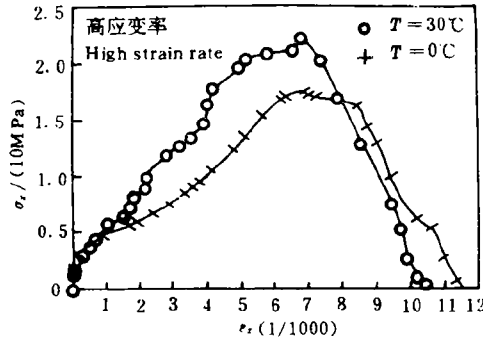


图4 TNT 低温实验结果
Fig. 4 Axial stress versus axial strain at high strain rate for TNT

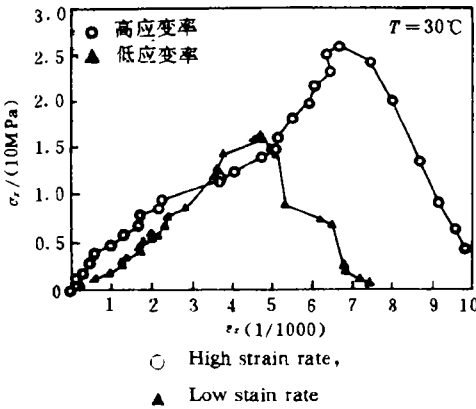


图5 Comp. B 低温实验结果
Fig. 5 Axial stress versus axial strain at -30°C for Comp. B

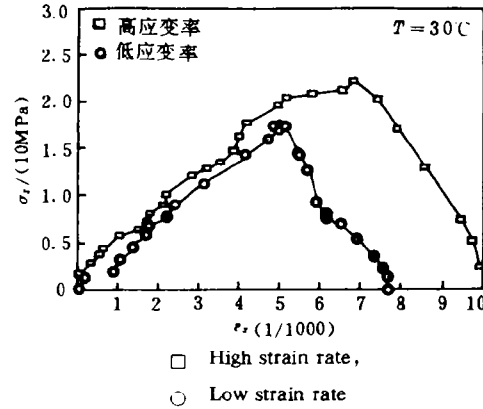


图6 TNT 低温实验结果
Fig. 6 Axial stress versus axial strain at -30°C for TNT

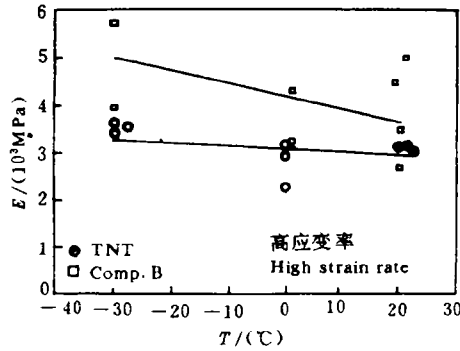


图7 Comp. B 和 TNT 实验结果比较
Fig. 7 Comparison of the experimental data for Comp. B and TNT

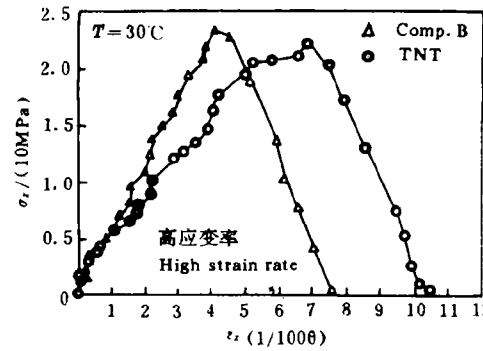


图8 Comp. B 和 TNT 实验结果比较
Fig. 8 Comparison of the experimental data for Comp. B and TNT

增大。(3)断裂应变 ϵ_m 随着应变率提高而增大,这说明在低温环境下,Comp. B 和 TNT 材料具有动态韧性,并且随着温度降低 ϵ_m 值增大,这和高温环境下的结论不同^[6]。(4)在低温

下受冲击压缩时,试件的破坏形状与高温下不同,高温下试件沿着轴向呈 45° 方向开裂,而在低温下试件是沿纵轴向裂开。(5)由表 2、表 3 和图 7、图 8 可以看出,Comp. B 比 TNT 的压缩模量 E 大约高 30%,这说明在 TNT 中加入 RDX 后, E 值提高;Comp. B 的压缩强度 σ_m 也有提高的趋势,但增加的幅度不大。(6)由图 7 还可以看出,Comp. B 比 TNT 对温度效应更为敏感。(7)图 9 表明 Comp. B 的应变率敏感性随着温度的降低而增大,而文献[6]的实验结果表明,Comp. B 在高温环境下,其 σ_m - $\log \dot{\epsilon}$ 曲线的斜率随着温度的升高而增大(见图 10),由此可以看出 Comp. B 在高、低温环境下所表现出的力学性能是不相同的。

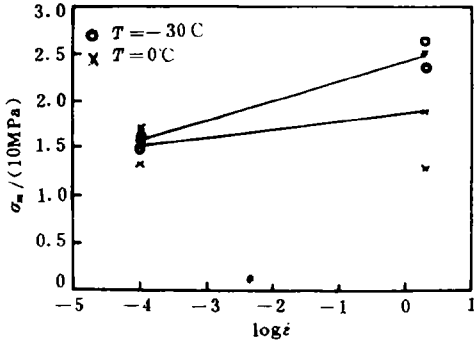


图 9 Comp. B 低温实验结果

Fig. 9 Experimental curve of low temperature for Comp. B

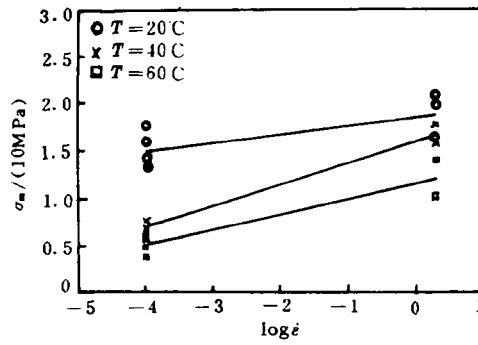
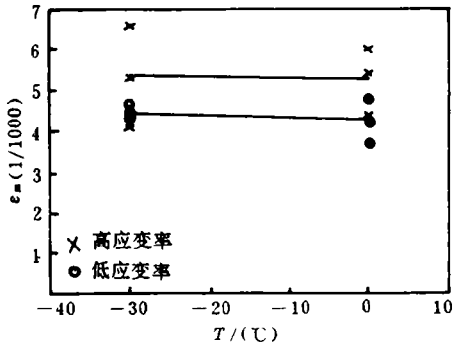


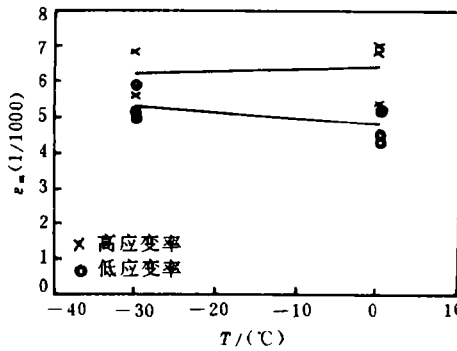
图 10 Comp. B 高温实验结果

Fig. 10 Experimental curve of high temperature for Comp. B



× High strain rate
○ Low strain rate

图 11 Comp. B 低温实验结果
Fig. 11 Fracture strain versus temperature for Comp. B



× High strain rate
○ Low strain rate

图 12 TNT 低温实验结果
Fig. 12 Fracture strain versus temperature for TNT

动态实验波形与静态测试的曲线不同,动态测试波形在初始部分显示的锯齿波纹。这是由于在很高的加载速率下,试件从初始速度为零的状态开始,在极短时间内(毫秒数量级)达到冲击速度并完成变形,试件内将产生很高的加速度,导致了惯性力的产生与应力波的传递。高速加载变形时,惯性力导致试件振动,应力波在试件内部传播和界面的反射造成了测试曲线的波动。由此可见,实验记录的曲线是试件的真实波形再叠加一定周期衰

减振动的惯性力振动波,并附加有一些其它的外界干扰信号。惯性力是造成测试波形波动的主要原因。在测试波形的初始部分,对应的惯性力最大,所受的影响也最大。

表 2 Comp. B 实验结果

Table 2 Summary of the experimental data for Comp. B

应变率	3/s		10 ⁻⁴ /s	
温度/°C	-30	0	-30	0
$\sigma_m/10\text{MPa}$	2.74±0.13	1.88±0.62	1.58±0.04	1.51±0.19
E/GPa	4.84±0.89	3.59±0.76	4.23±0.18	3.75±0.64
$\epsilon_m/10^{-3}$	5.35±1.25	5.27±0.87	4.45±0.15	4.20±0.50

表 3 TNT 实验结果

Table 3 Summary of the experimental data for TNT

应变率	3/s		10 ⁻⁴ /s	
温度/°C	-30	0	-30	0
$\sigma_m/10\text{MPa}$	2.08±0.02	2.05±0.30	1.58±0.24	1.36±0.30
E/GPa	3.52±0.08	3.09±0.82	2.97±0.63	2.82±0.28
$\epsilon_m/10^{-3}$	5.70±1.10	6.40±1.00	5.30±0.50	4.83±0.53

H. H. Kauch^[9]在测试高速加载条件下聚合物材料的力学性能时,在快速放油阀和作动筒之间附加一阻尼器,使试件中的初始加速度被减小,对消除惯性力的影响效果很好。

我们为了减少惯性效应对实验的影响,在数据处理时增加一柔度系数(该系数与加载杆长度和试验机系统等有关),这相当于打击端附上一层柔性介质,使试件中惯性效应减弱,实验波形的初始部分趋于光滑。

采用短圆柱试件也可减少惯性效应,但是试件长度很小时,其端部影响必须考虑,因此,试件的长度究竟取多大,这两方面的影响都要考虑。

4 结 论

综上所述,可以得到如下结论:

(1)采用自制的含能材料动态变温压缩实验装置,分别在 0°C、-30°C 低温环境下,对国产复合炸药 Comp. B 和单质炸药 TNT 进行了动态压缩实验,测试了压缩模量和压缩强度等力学性能参数。

(2)实验结果表明,在低温条件下,Comp. B 和 TNT 材料具有明显的应变率效应和温度效应。

(3)在低温环境下,Comp. B 和 TNT 材料具有动态韧性,并且随着温度降低,断裂应变 ϵ_m 值增大,这和高温环境下结论不同。

(4)和 TNT 比较,Comp. B 的压缩模量和压缩强度提高,其中压缩模量约增大 30%。

(5)在低温环境下,Comp. B 比 TNT 对温度效应更为敏感。

(6)讨论了惯性效应对动态实验波形的影响,通过引入柔度系数,使测试波形趋于光滑。

(7)介绍的实验方法为研究低温条件下含能材料的冲击压缩性能,提供了一套较为完整的技术和手段。

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 Materials*; 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 张元冲, 韩元平, 等. TNT 模拟炸药动态压缩力学性能的实验测定及本构关系研究. 西安交通大学学报(已接受发表).
- 7 韩小平, 张元冲, 等. 高能材料动态力学性能的研究. 爆炸与冲击(已接受发表).
- 8 胡国胜, 等. 发射药冲击断裂时的形态结构及其断裂破坏机理, 兵工学报, 1993, 1; 42~46
- 9 Kausch H H. Strength of Polymer Materials under Dynamic Loading. In: FEFG'94 International Symposium on Fracture and Strength of Solids, Xi'an, China, 1994.

EXPERIMENTAL STUDY OF IMPACT COMPRESSIVE PROPERTIES OF ENERGETIC MATERIALS

Han Xiaoping, Zhang Yuanchong, Li Hua, Shen Yapeng, Yin Min

(Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 71009)

Zhang Taihua, Zhao Zhuanghua

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

ABSTRACT In this paper, an experimental equipment of dynamic compression is used. Measurements of domestic Comp. B and TNT have been made in uniaxial compression as a function of strain rate at low temperature. The experimental results show that there is a clear relation between temperature and strain rate in Comp. B or TNT. The Young's modulus and compression strength of Comp. B are large than those of TNT. The dynamic experimental curves are smoothed with a method of introducing a factor of flexibility. A set of techniques and means have been provided to study dynamic mechanical properties of energetic materials at low temperature

KEY WORDS energetic materials, low temperature, strain rate effect temperature effect, dynamic toughness