

COM P. B 复合炸药动态力学性能和 塑性流动本构关系的研究¹⁾

韩小平 张元冲 沈亚鹏
(西安交通大学力学系, 西安 710049)
赵壮华 张泰华
(西安近代化学研究所, 西安 710061)

摘要 利用自制的含能材料动态变温三轴压缩实验装置, 采用准静态应变速率 ($10^{-4}/s$) 和中等应变速率 ($3/s$), 对国产复合炸药 Comp. B 进行了三轴压缩实验 测试了 Comp. B 在不同温度、不同应变速率条件下的杨氏模量 E , 泊松比 ν 和屈服强度 Y . 实验结果表明, Comp. B 具有明显的应变率相关和热软化效应 基于热激活模型, 作了适当的改进, 根据实验数据建立了含能材料塑性流动模型, 分析表明该模型能合理地描述率相关材料的塑性流动, 同时考虑了应变率和温度对塑性流动的影响 这些基础研究为含能材料动态力学性能的研究和炸药爆炸机理的理论分析提供了依据

关键词 三轴压缩, 应变率相关, 温度效应, 热激活理论, 塑性流动本构模型

引 言

随着兵器材料科学的飞速发展, 研究含能材料在中高应变速率下的力学行为近年来已经成为引人注目的课题, 无论在国内还是国际上都受到高度重视 在这个范围内, 热和机械力的耦合以及惯性效应使得动态响应和本构方程的描述变得较为复杂, 它涉及固体力学与材料科学、固体物理等多种学科之间的相互交叉和渗透 因此, 在各种复杂条件下含能材料动态力学性能的测试和动态本构关系的正确描述对兵器结构工程设计和数值模拟计算具有重要的意义

80年代以来, 由于研究方法和测试技术的不断改进和提高, 从而在材料动态性质的实验研究方面取得了很大的进展, 如分离式霍布金森杆 (SHPB)、轻气泡、电爆装置等已经获得广泛应用 与金属材料不同, 含能材料是粘塑性体, 并且由于安全性等因素, 对含能材料动态力学性能的研究要比一般工程材料复杂得多, 获得基本性能数据的工作很难

美国能源部所属的三大国防实验室, 特别是利费莫尔实验室以及英国的一些学者, 近年来, 对含能材料在各种复杂条件下的物理力学特性, 从实验到理论, 从宏观到微观进行了观测和分析 J. Pinto, S. Nicolaidis 和 D. A. Weigand^[1-3], 对 TNT 和 B 炸药在准静态和动态以及不同温度下, 分别测定了单轴、三轴压缩条件下各力学参数, 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 H. J. Hoffman^[4] 利用分离式霍布金

¹⁾ 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资助项目.

1995-02-28收到第一稿, 1995-06-15收到修改稿

森杆在应变速率 $10^2 \sim 10^4/s$ 范围内,研究了发射药的动态力学性能 我国目前已经建立了炸药在静态单向拉伸、压缩以及剪切条件下基本力学参数的测试方法并形成军标^[5,6] 文献[7],[8]发表了 TNT 炸药动态力学性能的研究工作

Comp. B 是双组分军用炸药,它的爆燃点($280 /s$)低于 TNT ($475 /s$)^[9],冲击敏感度要高于 TNT. 在加工、储存、运输和使用(如实弹发射)条件下,由于温度变化和受到突加速或强动载作用时,炸药装药可能产生损伤与破坏,在局部形成高温热点,继而引发反应,最终导致意外早爆事故,这是生产和使用部门十分关注的问题 为了防止这种意外爆炸事故,对 Comp. B 动态力学性能进行研究,提供可靠的力学参数是非常必要的 美国陆军研究机构从80年代开始至今,针对抗早爆弹丸系统的设计,围绕着 B 炸药配方的改进开展了一系列的研究工作^[10] 我们国内在有关炸药早爆机理方面的研究工作开展得还不多

材料的动态本构关系是结构材料受冲击载荷作用时其力学特性的基本表征 在兵器结构设计和数据模拟分析中要用到含能材料应力-应变关系,如果按一般的应变率无关材料来考虑,就不能真实反映含能材料的动态本构关系 在不同的应变速率和不同的应力状态下,同一种材料的变形机理和本构关系也可能不同 在单轴压缩条件下,固体炸药是脆性破坏,断裂强度小于屈服强度,文献[7]采用 Johnson 提出的热粘塑性本构方程,依据单轴实验结果拟合了 TNT 炸药随着加载速率和环境温度变化的本构关系 在三轴压缩条件下当载荷强度很大时,固体炸药开始塑性流动,在不同的环境温度和不同的加载速率下,其塑性流动方程也会有所不同,这时必须考虑应变速率和环境温度对塑性流动的影响 因此,建立含能材料在复杂应力条件下的动态本构模型,对于研究炸药早爆、高速撞击及绝热剪切致热机理等方面都具有很大意义

本文利用自制的含能材料动态变温三轴压缩实验装置,采用准静态应变速率($10^{-4}/s$)和中等应变速率($3/s$),对复合炸药 Comp. B 进行了三轴压缩实验 测试了 Comp. B 在不同温度、不同应变速率条件下的杨氏模量 E 、泊松比 ν 和屈服强度 Y . 实验结果表明,Comp. B 具有明显的应变率相关和热软化效应 和单质炸药 TNT 比较,Comp. B 的 E , ν 和 Y 值都有所提高 从材料内部原子结构本身的性质出发,分析讨论了固体炸药的动态力学性能明显地受应变率和温度影响 基于热激活模型,作了适当的改进,根据实验数据建立了含能材料塑性流动本构模型,分析表明该模型能合理地描述率相关材料的塑性流动,同时考虑了应变率和温度对塑性流动的影响 这些基础研究为含能材料动态性能的研究和炸药早爆机理的理论分析提供了依据

1 实验设备和实验方法

为了实现在不同环境温度和不同加载速率条件下的冲击压缩实验,需要研制出一整套冲击加载装置,并配备相应的数据采集处理系统 我们自制的含能材料三轴冲击压缩实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)含能材料三轴压缩环境室 (3)加温恒温系统 (4)数据采集处理系统

采用 MTS 880-10 材料试验机提供轴向压力,试件中承受应力可达 300 MPa 通过计算机加载速率控制曲线实现应变速率的控制,最高应变速率可达 $3/s$

三轴压缩环境室是该装置的核心部分,见图3 其中厚壁钢套和安全罩用淬火钢制成,可耐高温高压,以保障实验的安全 上、下托盘是为了保证试件的对中以及支承钢套 该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)采用淬火钢制成厚壁钢套和安全罩,可以保证含能材料在高温高应变速率下加载的安全性 (3)含能材料的熔

图1 含能材料三轴压缩实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experiment set-up



图2 试件受力状况

Fig. 2 Loading illustration

图3 含能材料三轴压缩环境室

Fig. 3 Environment chamber of triaxial compression

点较低,如 TNT 的熔点为 82.5°C ,升温后材料极易软化,难以在常规三轴室进行温度试验,本文介绍的三轴压缩环境室可以不受材料热软化的影响

加温恒温系统由恒温室、温度调节控制器、BA₂热电偶、直读温度计等部分组成

数据采集处理系统用来测量载荷、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

实验材料选用国产复合炸药 Comp. B. 表1列出国产 Comp. B 炸药的主要成分. 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 药柱的密度为

1. 686g/cm³.

表1 试件材料的主要成分

Table 1 Component of specimen

	TNT	RDX	WAX
Comp. B	59.5%	39.5%	1%

实验时,在试件表面涂以石墨粉后放入钢套内孔中,以减小摩擦力.进行温度实验时,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实验

在实验之前,需要对应变片及动态应变仪的放大倍数进行标定,开始实验后,经应变仪放大的讯号直接进入瞬态数字记忆示波器,记录、存储,然后用数据传递程序将所记录的讯号转换为计算机用数据

2 实验结果和讨论

利用上述实验装置以及力学参数的测试、分析、处理系统,对国产 Comp. B 复合炸药,在室温以上的三种温度下,分别采用准静态应变速率(10^{-4} /s)和中等应变速率(3/s),进行了三轴压缩实验.测试原理和力学参数的计算方法见文献[7].

表2给出在三种温度、两种应变速率条件下 Comp. B 的杨氏模量、屈服强度和泊松比

表2 Comp. B 三轴压缩实验结果

Table 2 Summary of the experiment data for Comp. B

Strain rate	3/s			10^{-4} /s		
	24	42	62	23	40	51
Temperature/						
Young's modulus /GPa	4.10	3.95	2.20	3.63	3.30	2.87
Yield strength /10M Pa	6.00	6.45	3.00	5.07	4.30	3.35
Poisson's ratio	0.38	0.39	0.45	0.34	0.36	0.37

图4,图5和图6分别给出 Comp. B 的 σ_x-t (轴向应力-时间) 曲线, $\sigma_x-\epsilon_x$ (轴向应力-轴向应变) 曲线和 $\sigma_r-\sigma_x$ (径向应力-轴向应力) 曲线

图7,图8和图11对 Comp. B 和 TNT 两种炸药的实验曲线进行了比较,有关 TNT 的实验数据见文献[7].

图9,图10和图11分别给出 Comp. B 的泊松比 ν , 屈服强度 Y 以及杨氏模量 E 随着温度变化的情况,同时对准静态应变速率和中等应变速率两种情况进行了比较

实验结果表明: (1) Comp. B 对加载速率很敏感,当加载速率提高时,其杨氏模量 E 和屈服强度 Y 都有明显的增大,在40 的环境温度下,当应变速率由 10^{-4} /s 增大到3/s 时, E 值约提高20%. (2) 由图10,图11和表2可看出,Comp. B 的力学性能明显地依赖于温度和加载速率,随着温度升高,杨氏模量 E 和屈服强度 Y 降低,在快速加载情况下,当 Comp. B 从40 加热到60 时, E 值约下降80%,这说明在高温环境下,Comp. B 具有明显的热软化效应 (3) 随着温度升高,泊松比有所增加,这可以从温度升高时,热软化效应起了作用来解释 (4) 由图7,图8和图11可大致看出,Comp. B 的杨氏模量和屈服强度都比 TNT 的相应值增大,其中杨氏模量约提高25%,有关 TNT 的详细数据见文献[7],这说明在 TNT 中加入 RDX 后, E 和 Y 值都有提高

在- 50 ~ 50 温度范围内,对工程常用金属而言, E 的变化极小,一般不考虑温度的影响.但是由 Comp. B 的实验结果可看出,在室温到60 温度范围, E 值的大小明显受温度的影响

金属弹性主要取决于它内部原子的键合强度, 金属组织结构的变化或少量的合金化对杨氏

图4 轴向应力-时间曲线

Fig 4 Axial stress versus time curve

图5 轴向应力-轴向应变曲线

Fig 5 Axial stress versus axial strain curve

图6 径向应力- 轴向应力曲线

Fig 6 Radial stress versus axial stress curve

图7 Comp. B 和 TNT 实验结果比较

Fig 7 Comparison of the experiment data for Comp. B and TNT

图8 Comp. B 和 TNT 实验结果比较

Fig 8 Comparison of the experiment data for Comp. B and TNT

图9 泊松比-温度曲线

Fig 9 Poisson's ratio versus Temperature curve

图10 屈服强度-温度曲线
Fig 10 Yield strength versus
temperature curve

图11 Comp. B 和 TNT 实验结果比较
Fig 11 Comparison of the experimnt
data for Comp. B and TNT

模量的影响不大。固体炸药的密度比金属小得多,而颗粒之间的空隙比金属大得多,它们对组织成分的改变要比金属敏感得多,因此,在 TNT 中加入高弹性模量的 RDX 后,可显著提高杨氏模量。文献[1]也介绍了 Comp. B 的压缩应力-应变曲线随着浇注工艺条件、RDX 颗粒粗细和组分而变化。

一般认为金属材料的动态实验中,加载速度对杨氏模量 E 没有多大影响,理由是因为金属的弹性变形速度极快,约为 $10^3 \sim 10^4 \text{ m/s}$,而普通试验机的加载速度只能达到 $10^0 \sim 10^1 \text{ m/s}$,因此工程上通常的加载速度不会明显影响材料的杨氏模量。但是,固体炸药的动态实验结果与上述概念不符,实验表明,在 40°C 的环境温度下,当应变速率由 $10^{-4}/\text{s}$ 提高到 $3/\text{s}$ 时, E 值约增大 20%,显示了相当大的应变率效应,在设计和计算中忽略此效应会导致较大的误差。文献 [11], [12] 给出 TNT 的颗粒直径为 $25 \sim 110 \mu\text{m}$,和金属比较,固体炸药的晶粒要大得多,而它的熔点很低,并且比热也比金属材料低得多(如 TNT 的比热为 $0.262 \text{ w/m}^\circ\text{C}$),在一般材料试验机的加载速度下,药柱试件的应力率可达到 18.5 MPa/m s ,这个数值已达到实弹发射状态时炸药药柱所承受的加压速率的 $1/2$,在这样复杂的应力状态下,炸药装药呈粘塑性性质,因此用一般金属材料的概念是难以解释其动态力学性能的。

以上分析可以认为,在室温到 60°C 温度范围,当应变速率由 $10^{-4}/\text{s}$ 增大到 $3/\text{s}$ 时,固体炸药的各种力学性能参数都受到明显的影响,固体炸药的动态力学性能与金属材料大不相同。

3 固体炸药塑性流动的本构方程

如前所述,含能材料具有明显的应变率相关和温度效应,因此其动态本构模型要能真实反映应变率和温度的影响。为了描述含能材料的动态力学行为,基于热激活理论,我们试图从含能材料塑性变形过程中微观结构的演化来推导出塑性流动本构方程,建立宏观本构关系与微观机制间的联系。

材料的宏观塑性剪切应变率可用微观位错参量来描述^[13]

$$\dot{\gamma} = \alpha \rho_m \bar{v} b \quad (1)$$

式中 ρ_m 为可动位错的密度, \bar{v} 为位错的平均运动速度, b 为 Burgers 矢量, α 为系数。

在三轴压缩状态, 当应力超过屈服点时, 可以认为塑性流动区域内位错运动主要为热激活所控制, \bar{v} 可表示为^[13]

$$\bar{v} = v_0 \exp(-\Delta G / K T_k) \quad (2)$$

式中 K 是 Boltzman 常数, T_k 为绝对温度, ΔG 为激活能 (Gibbs 自由能), v_0 可取为晶体中最大剪切波速^[13, 14]. ΔG 可表示为应力的线性函数^[14]

$$\Delta G = \Delta G_0 - V_\tau (\tau - \tau_i) \quad (3)$$

式中 V_τ 为激活体积, τ 是外加的总切应力, τ_i 是应力的非热成分.

将式 (2) 代入式 (1) 得到塑性剪切应变率为

$$\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_0 \exp(-\Delta G / K T_k) \quad (4)$$

$$\dot{\gamma}_0 = \alpha \rho_m b \cdot v_0 \quad (5)$$

利用式 (3), 将式 (4) 可改写为

$$\ln \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0} = - \left[\frac{\Delta G_0 - V_\tau (\tau - \tau_i)}{K T_k} \right] \quad (6)$$

整理后得到

$$\tau = \tau_i + \frac{\Delta G_0}{V_\tau} - \frac{K T_k}{V_\tau} \ln \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0} \quad (7)$$

当材料开始塑性流动时, 采用 V. Mises 屈服准则, 屈服极限为

$$Y_{v,m} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2} \quad (8)$$

如采用 Tresca 屈服准则, 屈服极限为

$$Y_T = |\sigma_x - \sigma_y| \quad (9)$$

在三轴压缩载荷作用下, 由于对称性, $Y_{v,m} = Y_T$, 因此, 以上两种屈服准则给出相同的屈服极限

$$Y = |\sigma_x - \sigma_r| \quad (10)$$

在塑性流动过程, 切应力为

$$\tau = \frac{\sigma_x - \sigma_r}{2} \quad (11)$$

将 (10), (11) 代入 (7) 得到

$$Y = 2 \left[\tau_i + \frac{\Delta G_0}{V_\tau} - \frac{K T_k}{V_\tau} \ln \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_0} \right] \quad (12)$$

由 (1)~ (3), (6), V_τ 可表示为 (在给定环境温度下)

$$V_\tau = K T_k \left[\frac{\partial \ln(\dot{\gamma} / \dot{\gamma}_0)}{\partial \tau^*} \right]_\tau \quad (13)$$

$$\tau^* = \tau - \tau_i \quad (14)$$

因为在实验中只采用两种应变速率, 则式(15)中的偏微分可近似用有限差分来表达, 因此(13)式变为

$$V_{\tau} = 2KT_k \left[\frac{\Delta \ln(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0)}{\Delta Y} \right] \quad (15)$$

式中用 $(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0)$ 代替 $(\dot{\gamma}/\dot{\gamma}_0)$.

综合以上各式得到

$$Y = 2\tau + \frac{[\Delta G_0/KT_k + \ln(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0)]\Delta Y}{\ln(\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0)} \quad (16)$$

式(16)右边第二项括号内为正值, ΔY 可由实验数据确定, 图10给出的实验曲线表明, $\Delta Y > 0$ 式(16)中的 τ , ΔG_0 和 $\dot{\epsilon}_0$ 三个参数需要通过实验来确定 屈服强度 Y 对温度和应变速率的相关性, 可由(16)式进行定性分析, 当应变速率给定时, Y 随着温度升高而降低; 在给定环境温度情况下, Y 随着应变速率的提高而增大 这个结论和实验结果是一致的

以上建立含能材料塑性流动本构模型的工作只是初步尝试, 还存在一些问题, 如表达式中几个参数的物理意义还不够明确, 还需要结合实验, 进一步探寻含能材料塑性流动本构关系的物理本质; 在实验中只采用了两种应变速率, 要更加真实地反映应变速率的影响, 还应采用更多的不同的应变速率进行实验; 公式中的参数, 如 $\dot{\epsilon}_0 \sim \rho_m \bar{v} b$, 其中 ρ_m , \bar{v} 和 b 这几个材料常数都和位错有关, 它们的确定还需要设计其它一些实验 这方面的工作还有待进一步深入和完善

4 结 论

1) 实验结果表明, 在三轴冲击压缩条件下, 国产 Comp. B 炸药具有明显的应变速率效应和温度效应 当应变速率由 $10^{-4}/s$ 提高到 $3/s$ 时, 杨氏模量 E 、屈服强度 Y 和泊松比 ν 都有明显增大; 随着温度升高, E 和 Y 值降低, 而 ν 值却有所增加

2) 和 TNT 比较, Comp. B 的 E 和 Y 值都有所提高, 这说明含能材料对组织成分的改变较敏感

3) 因为一般含能材料的晶粒大, 熔点和比热低, 在室温以上温度和动态加载条件下呈粘塑性性质, 所以, 应变速率和温度改变对其性能有很大影响

4) 在位错运动的热激活理论的基础上, 作了适当的改进, 结合实验数据建立了含能材料塑性流动模型 分析表明该模型能很好地反映应变速率和温度对塑性流动的影响

致谢 参加本项实验工作的还有李华工程师, 殷民等, 谨表谢意

参 考 文 献

- 1 Weigand DA, 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 DA. 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 DA, 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 Hoffman HJ. High strain rate testing of gun propellants Technical Rept, AD-A 208826, 1988
- 5 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
- 6 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

- 7 韩小平, 张元冲, 沈亚鹏等. 高能材料动态力学性能的研究. *爆炸与冲击*, 1995, 15(1): 20~ 27
- 8 韩小平, 张元冲, 沈亚鹏等. 快速加载下 TNT 材料中绝热剪切带的微观研究. *实验力学*, 1995, 10(2): 1~ 8
- 9 含能材料手册, 西安近代化学研究所, 1985
- 10 赵壮华. 炸药装药发射安全性问题探讨. *兵工学报*, 1994(5)
- 11 Cartwright M, Collett GC. Effect of additives on the nucleation of TNT. *J Energetic Materials*, 1993, 11: 167~ 194
- 12 Moulard H. The effect of RDX particle size on the shock sensitivity of cast PBX formulations. Eighth Symposium on Detonation, 1985. 248
- 13 Gilman JJ. Dislocation Dynamics, 1968
- 14 Perzyna P. *Revue Phys Appl*, 1988, 23: 445

A STUDY OF DYNAMIC MECHANICAL RESPONSE AND CONSTITUTIVE MODEL OF ENERGETIC MATERIALS

Han Xiaoping Zhang Yuanchong Shen Yapeng

(Department of Mechanics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Zhao Zhuanghua Zhang Taihua

(Xi'an Modern Chemistry Research Inst., Xi'an 710061, China)

Abstract An experiment equipment of triaxial dynamic compression is used. Measurements of domestic Comp. B have been made in triaxial compression as a function of temperature and strain rate. Young's modulus, yield strength and Poisson's ratio have been obtained. The experiment results show that there is clear temperature and strain rate dependence in Comp. B. The Young's modulus and yield strength of Comp. B are larger than those of TNT. Based on the thermally activated theory a plastic flow constitutive model is suggested. The results of analysis indicate that by the constitutive model the strain rate and thermal effect of Comp. B are properly described.

Key words triaxial compression, strain rate effect, temperature effect, thermally activated theory, plastic flow constitutive model