

# 基于 J-C 本构模型的 Comp.B 炸药落锤冲击数值模拟

李 凯<sup>\*,1)</sup> 朱建生<sup>\*</sup> 钱志博<sup>\*</sup> 董树南<sup>†</sup> 倪 添<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>(西北工业大学航海学院, 西安 710072) <sup>†</sup>(西安近代化学研究所, 西安 710065)

**摘要** 为研究 Comp.B 炸药在惯性冲击下的力学响应特性, 基于 Johnson-Cook 本构模型, 对点火前的 Comp.B 炸药大落锤 (400 kg) 冲击实验进行了数值模拟. 在不同应力加载条件下模拟计算得到了用状态方程和不用状态方程的  $\sigma-t$  曲线, 对比应力峰值、应力上升时间等主要力学参数, 结果表明考虑了状态方程的数值模拟结果与实验吻合最好, 可以很好地模拟炸药惯性冲击下的力学响应.

**关键词** J-C 模型, Comp.B 炸药, 落锤冲击实验

**中图分类号:** O344.1, TQ560.71 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0879(2011)01-021-04

## NUMERICAL SIMULATION OF DROP WEIGHT IMPACT TESTS FOR COMP.B USING JOHNSON-COOK CONSTITUTIVE MODEL

LI Kai<sup>\*,1)</sup> ZHU Jiansheng<sup>\*</sup> QIAN Zhibo<sup>\*</sup> DONG Shunan<sup>†</sup> NI Tian<sup>\*</sup>

<sup>\*</sup>(College of Marine, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

<sup>†</sup>(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, China)

**Abstract** The high-mass (400 kg) drop weight impact tests for no ignition Comp.B were numerically simulated by using the Johnson-Cook constitutive model, to investigate the mechanical response characteristics of Comp.B in inertial impact.  $\sigma-t$  curves of numerical simulation with EOS and without EOS were obtained at different charge conditions. The main mechanical parameters are compared, such as peak stress, stress rise time, etc., The results of Johnson-Cook constitutive model with EOS agree better with experiments. This model can be used to simulate the mechanical response characteristics of explosive in inertial impact.

**Key words** J-C constitutive model, Comp.B explosive, drop weight impact tests

### 引 言

惯性冲击不同于一般的冲击载荷, 其强度较低 ( $< 1 \text{ GPa}$ ), 持续时间较长 (约几个毫秒). 近年来, 许多国家都在发展具有强侵彻能力的深钻地弹, 这种弹对于炸药的抗惯性冲击能力要求很高, 在发射过程中要承受很高的加速度作用, 在侵彻过程中要承受很高的减速度作用, 常规弹药往往难以满足这样的要求. 为此需要对炸药惯性冲击下的力学响应特性进行深入研究. 目前, 国内外已进行了一系列相关的实验研究, 如: 高速离心实验、侵彻实验、大落锤冲击实验<sup>[1]</sup>(其工作原理与火药发射模拟基本一样, 都是为了实现弹药在发射过程中的强化模拟)等, 还未

见炸药惯性冲击下的力学响应特性数值模拟的公开报道.

因此, 本文基于 Johnson-Cook 本构模型<sup>[2]</sup>, 对点火前的 Comp.B 炸药 (59.5%RDX, 39.5%TNT 和 1%WAX) 大落锤冲击实验进行了数值模拟. 探讨初步建立 Comp.B 炸药惯性冲击下宏观力学模型的可行性, 验证 Comp.B 炸药落锤冲击加载实验的有效性.

### 1 实验设备

实验采用落锤冲击加载模拟系统, 模拟装药于  $\Phi 40 \text{ mm} \times 28 \text{ mm}$  的药筒中, 实验所用 Comp.B 炸药

2010-07-12 收到第 1 稿, 2010-12-08 收到修改稿.

1) 李凯, 1978 年生, 男, 硕士研究生, 研究方向为含能材料本构关系. E-mail: leeaoe@sina.com

物理参数见表 1. 药柱两端用密封垫密封, 实验中落锤重量为 400 kg, 落锤通过活塞实现对炸药装药的应力加载, 通过调整落锤的落高来实现不同应力加载. 落锤加载模拟实验系统如图 1.

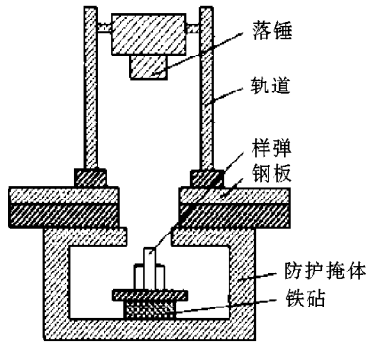


图 1 实验装置示意图

通过应力传感器测得落锤在相应落高下炸药未爆时底部应力曲线.

## 2 力学本构模型及状态方程

### 2.1 Johnson-Cook 本构模型

本质上讲, 材料的本构关系应该体现材料的微观结构的变形规律<sup>[3]</sup>. 但由于该类材料的动态力学行为比较复杂, 目前只能建立各种近似的本构模型来描述其变形规律<sup>[4-5]</sup>, 如一些基于实验拟合的本构模型. 考虑 Comp.B 炸药具有明显的应变率效应<sup>[6-7]</sup>, 本文采用了率相关的 Johnson-Cook 本构模型. 该本构模型是 Johnson GR 和 Cook WH 在研究高应变率条件下金属材料力学性能时提出的一个比较有影响的经验模型. 该模型能够较好地反映材料的加工硬化, 应变率效应和温度软化现象, 形式简单, 物理意义明确. 其一般形式为

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)[1 + C \ln(\dot{\varepsilon}^*)][1 - (T^*)^m] \quad (1)$$

其中, 等效流应力  $\sigma$  依赖于塑性应变  $\varepsilon$ , 塑性应变率  $\dot{\varepsilon}$  和温度  $T$ . 式中  $A, B, C, n, m$  是模型的参数, 与温度和应变率无关, 可以通过实验拟合确定<sup>[8]</sup>,  $A, B$  是具有应力的量纲, 其余为无量纲量.  $T^*$  为无量纲温度, 是温度  $T$  的线性函数,  $T^* = (T - T_r)/(T_m - T_r)$ ,  $T_r$  为室温,  $T_m$  是软化温度, 在室温条件下  $T^* = 0$ , 在软化温度条件下  $T^* = 1$ , 它的值是在  $0 \leq T^* \leq 1$  范围之内. 无量纲量  $\dot{\varepsilon}^*$  是塑性应变率  $\dot{\varepsilon}$  和一个常量  $\dot{\varepsilon}_0$  的比值, 一般情况取  $\dot{\varepsilon}_0 = 1 \text{ s}^{-1}$ . 如果  $\dot{\varepsilon}^* < 1$ , 在公式中这个对数值应该被设置为 0.

### 2.2 Gruneisen 状态方程

由于 Johnson-Cook 模型本身只描述了偏应力和偏应变的塑性部分, 在高应变率、大变形条件下, 体积变形部分需要用状态方程来描述. 常用的高压固体状态方程包括 Bridgman 方程、Murnaghan 方程和 Gruneisen 方程. 前两者分别描述了等温过程和等熵过程的 P-V 关系, 它们只是特定条件下的材料各参量间的相互关系. 而 Gruneisen 方程是根据能量守恒定律在着眼于微观的统计力学和着眼于宏观的热力学之间建立联系, 得到了压力与比容 (即体积变形) 的关系. 它考虑了  $P, V$  和其他热力学参量间的关系, 是高压条件下最常用的一种内能形式的固体状态方程. 炸药在落锤冲击加载下实际近似一种绝热熵增的压缩过程, 采用 Gruneisen 状态方程显然更为合理. 该方程可表示为

$$P = \frac{\rho_0 C_0^2 \mu \left[ 1 + \left( 1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) \mu \right]}{[1 - (s_1 - 1)\mu]^2} + \gamma_0 E_0 \quad (2)$$

式中,  $P$  为静水压力,  $\rho_0$  为初始密度,  $C_0$  为体积声速,  $E_0$  为初始内能,  $\mu$  为压缩比,  $\mu = \rho/\rho_0 - 1$ ,  $\gamma_0$  为 Gruneisen 常数, 可以通过理论计算和实验测定获得.

## 3 数值模拟模型

数值模拟选用 ANSYS/Ls-dyna 3-D 有限元程序, 模拟尺寸为  $\Phi 40 \text{ mm} \times 28 \text{ mm}$  的 Comp.B 炸药在大落锤不同落高下的惯性冲击加载实验. 为减小计算量, 将落锤简化为刚性墙, 为减少沙漏效应, 接触算法采用罚函数接触. 计算结构模型如图 2 所示.

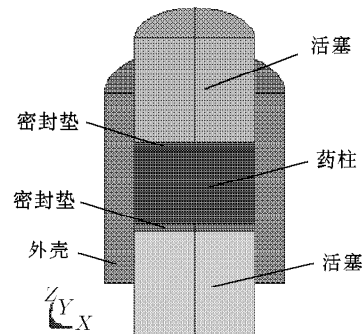


图 2 落锤冲击实验数值模型示意图

壳体、活塞采用 T10 钢, 密封垫采用聚乙烯材料, 参数见表 1. 炸药选用 Johnson-Cook 本构模型, 参数根据万能材料试验机准静态压缩实验和 Hopkinson 动态压缩实验测量得到的不同温度和应变率

条件下  $\sigma - \varepsilon$  实验曲线拟合确定. 式 (1) 中  $A, B, n$  包含在方程  $\sigma = A + B\varepsilon^n$  中,  $A$  是在不同温度下材料的屈服强度, 可由  $\sigma - \varepsilon$  曲线直接获得, 本文中近似取  $A = 0$ .  $B\varepsilon^n$  反映  $\sigma - \varepsilon$  曲线的硬化比例, 因此,  $B$  和材料硬化指数  $n$  可根据方程  $\ln(\sigma - A) = \ln B + n \ln \varepsilon$  获得. 应变率敏感指数  $C$  可通过求方程  $\sigma = 1 + C \ln(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0)$  的斜率得到. 温度软化指数  $m$  可根据方程  $\ln \sigma = m \ln T^*$  获得, 参数见表 2, Gruneisen 方程参数参考文献 [9].

表 1 材料物理参数

材料	钢	聚乙烯	Comp.B
$\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	7.85	0.95	1.68
$E/\text{GPa}$	207	1.1	4.1
$PR$	0.3	0.42	0.38
屈服应力 /MPa	1 620	-	-
$C_P/(\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1})$	0.434	-	1 150

表 2 J-C 本构模型拟合参数

$A/\text{MPa}$	$B$	$C$	$n$	$m$
0	3 504	0.0623	1.012	1.025

### 4 结果分析

分别采用 Gruneisen 状态方程和不用状态方程的 Johnson-Cook 本构模型进行数值模拟, 得到不同落高下 Comp.B 炸药底部的  $\sigma - t$  曲线.

图 3 和图 4 分别显示了加载落高为 1000 mm 和 1750 mm 时, 数值模拟的试样底部有效应力随时间变化的曲线. 与落锤冲击实验曲线比较可以看出: 考虑了状态方程的模拟曲线与实验曲线最接近, 基本可以覆盖实验测得的曲线, 特别是应力上升阶段,

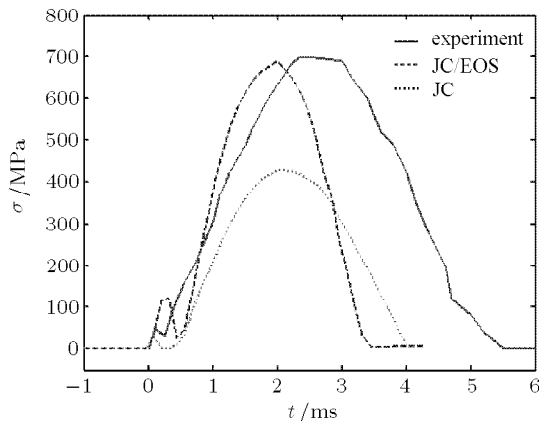


图 3 锤重 400 kg、落高 1000 mm、药柱  $\Phi 40 \text{ mm} \times 28 \text{ mm}$  时数值模拟的  $\sigma - t$  曲线和实验曲线对比

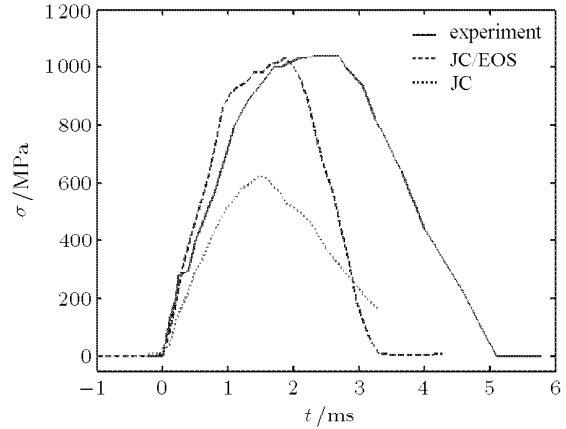


图 4 锤重 400 kg、落高 1750 mm、药柱  $\Phi 40 \text{ mm} \times 28 \text{ mm}$  时数值模拟的  $\sigma - t$  曲线和实验曲线对比

应力上升速率和应力峰值与实验曲线都吻合得比较好. 未考虑状态方程的模拟曲线的应力上升速率和应力峰值都比较低. 在应力下降阶段模拟曲线应力作用时间略短一些, 这可能是由于冲击过程中炸药的内部损伤不断积累引起了宏观力学性能的显著变化, 而 Johnson-Cook 本构模型并未考虑材料的损伤因素. 总体来看, 数值模拟的  $\sigma - t$  曲线与实验曲线的趋势基本一致, 考虑了 Gruneisen 状态方程的模拟曲线与实验曲线更相符.

### 5 结 论

(1) 以 Comp.B 炸药为例, 分别进行了用 Gruneisen 状态方程和不用状态方程的 Johnson-Cook 本构模型的大落锤冲击实验数值模拟. 前者的模拟曲线与实验结果最接近, 说明了大落锤冲击下炸药力学响应模型考虑状态方程是必要的.

(2) 考虑 Gruneisen 状态方程的 Johnson-Cook 本构模型很好地描述了 Comp.B 炸药大落锤冲击下主要的力学响应特性, 验证了该模型用于炸药惯性冲击下宏观力学特性分析的可行性, 为其力学响应的研究提供了有效的依据.

(3) 该模型对于应力下降阶段的预测还存在不足, 要使模型和实验结果吻合得更好, 还应从细观力学角度考虑惯性冲击下炸药材料损伤的发展和演化, 引入损伤修正项对模型进行修正.

### 参 考 文 献

1 王世英, 胡焕性. B 炸药装药发射安全性落锤模拟加载实验研究. 爆炸与冲击, 2003, 23(3): 275-278 (Wang Shiyong, Hu Huanxing. Drop hammer simulation study on launch safety of composite B. *Explosion and Shock Waves*, 2003, 23(3): 275-278 (in Chinese))

- 2 Johnson GR, Cook WH. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures. In: Proceedings of the Seventh International Symposium on Ballistics. The Hague, Netherlands, 1983. 541-547
- 3 Bischoff PH, Perry SH. Compressive behavior of concrete at high strain rate. *Materials and Structures*, 1991, 24(6): 425-450
- 4 吴会民, 卢芳云. 一种高聚物粘结炸药和 B 炸药的本构关系研究. 高压物理学报, 2005, 19(2): 139-144 (Wu Huimin, Lu Fangyun. Research on constitutive relation of a polymer bonded explosive and pressed comp.B. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2005, 19(2): 139-144 (in Chinese))
- 5 罗景润, 张寿齐, 赵方芳等. 简单拉伸下高聚物粘结炸药的非线性本构关系. 实验力学, 2000, 8(1): 42-45 (Luo Jingrun, Zhang Shouqi, Zhao Fangfang. Nonlinear constitutive relation of PBX under simple tension. *Energetic Materials*, 2000, 8(1): 42-45 (in Chinese))
- 6 吴会民, 卢芳云, 卢力等. 三种含能材料力学行为应变率效应的实验研究. 含能材料, 2004, 12(4): 227-230 (Wu Huimin, Lu Fangyun, Lu Li, et al. Experimental studies on strain-rate effects of mechanical behaviors of energetic materials. *Energetic Materials*, 2004, 12(4): 227-230 (in Chinese))
- 7 韩小平, 张元冲, 沈亚鹏等. Comp.B 复合炸药动态压缩力学性能和本构关系的研究. 实验力学, 1996, 11(3): 303-310 (Han Xiaoping, Zhang Yuanchong, Shen Yapeng. Dynamic behavior and constitutive model of Comp.B explosive. *Journal of Experimental Mechanics*, 1996, 11(3): 303-310 (in Chinese))
- 8 范亚夫, 段祝平. Johnson-Cook 材料模型参数的实验测定. 力学与实践, 2003, 25 (5): 40-43 (Fan Yafu, Duan Zhuping. Cylinder explosive test and material model of Johnson-Cook. *Mechanics in Engineering*, 2003, 25 (5): 40-43 (in Chinese))
- 9 李小笠, 赵国志, 李文彬. 长杆体垂直冲击带盖板炸药的临界起爆准则. 弹道学报, 2004, 16(2): 51-55 (Li Xiaoli, Zhao Guozhi, Li Wenbin. Critical energy criterion used to predict covered explosives impacted by rod. *Journal of Ballistics*, 2004, 16(2): 51-55 (in Chinese))

(责任编辑: 刘俊丽)