

# 推进剂损伤对其燃烧稳定影响的实验和数值研究

张泰华 王世英 刘培德

中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室, 北京 100080  
西安近代化学研究所, 西安 710065

**摘要** 为研究高能固体推进剂NEPE损伤对其燃烧性能的影响, 建立了以大型落锤为加载手段, 扫描显微镜、声速和密度测量为损伤观察和检测手段, 密闭爆发器为研究推进剂燃烧规律的实验系统。同时, 建立了推进剂床在高压条件下的一维两相流模型, 并对其进行了数值求解。结果显示, 数值模拟和实验测得的燃烧压力~时间曲线符合较好。

**关键词** 高能推进剂, 损伤, 燃烧, 两相流

**中图分类号** TQ 562.1, TQ 175.655.3

在研推进剂能否应用于武器系统, 使武器获得稳定的弹道性能, 关键是燃烧问题。研究推进剂的燃烧性能就是研究其燃速的变化规律性和燃烧过程的稳定性。在一定条件下, 推进剂的燃烧特性与其爆轰特性之间存在着相关性。推进剂的损伤对燃烧稳定和爆轰形成有无影响? 随着目前高能推进剂配方中大量高能炸药的添加, 这些问题日益受到重视。

本工作以NEPE推进剂为研究对象, 用密闭爆发器为实验手段, 研究在典型载荷作用下推进剂试样中物理结构的改变是如何影响其燃烧行为的, 同时用带化学反应的一维两相流模型模拟燃烧行为, 以加深对研究损伤影响推进剂燃烧转爆轰行为机理的认识。

## 1 撞击损伤的产生与观察

### 1.1 损伤产生

为模拟战场上低速飞片/弹丸、跌落等撞击对NEPE推进剂的损伤, 将400 kg落锤从 $H = 0.1\text{ m}$ 处自由落下, 撞击直径 $D = 0.04\text{ m}$ , 厚 $L = 0.01\text{ m}$ 的试样。实验装置见图1。加载曲线见图2, 图中峰值压力 $p_m = 145\text{ MPa}$ 。在撞击过程中, 试样变形很大, 厚度迅速减小, 大部分试样被挤压到两铝隔板周围。在这段时间内, 有一低压积累过程, 加载曲线上出现一平台, 平台开始压力为 $39\text{ MPa}$ 。平台阶段过后, 意味着试样的径向流动基本结束, 两隔板之间只剩

收稿日期: 2000-12-12

有一薄层试样 然后,压力又继续上升. 撞击后,试样很快恢复 该推进剂具有良好的可恢复变形的能力,属粘弹性材料

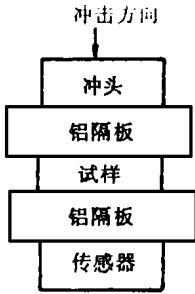


图1 撞击实验简图

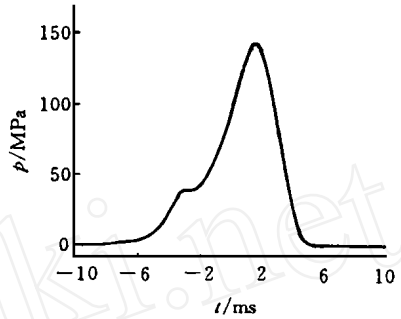


图2 加载曲线

### 1.2 显微观察

原始试样与损伤试样的显微结构形貌如图3所示 由图3(b)可以看出: (1) 基体材料充分拉伸,在其内部固有缺陷或应力集中处(如大颗粒周围)裂纹萌生扩展,有大量微裂纹/孔隙产生 (2) 大颗粒直接从基体材料上脱离,而颗粒本身并无明显变化;小颗粒仍被基体材料包裹

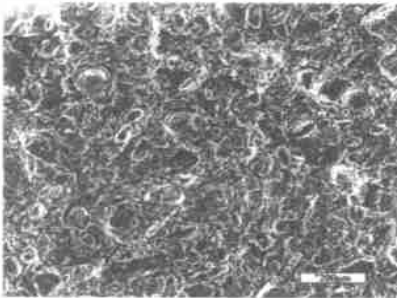


图3(a) 原始试样显微结构形貌(×100)

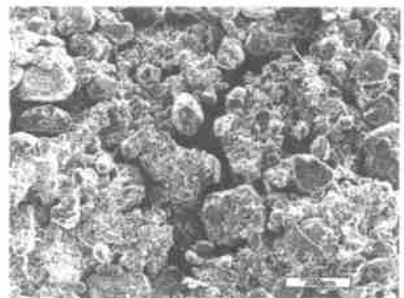


图3(b) 损伤试样显微结构形貌(×100)

### 1.3 密度检测

在延性损伤情况下,缺陷体积随损伤增大而增大 可用试样密度的减小定义损伤变量<sup>[1]</sup>

$$D_A = (1 - \rho_1/\rho_0)^{2/3} \tag{1}$$

式中:  $\rho$  为密度,下标“0”、“1”分别为原始和损伤试样 损伤变量 $D_A$  反映了损伤后试样缺陷变化的程度

根据机械电子工业部第204所标准(Q/A Y·C6- 87),采用悬丝法测密度(原理为阿基米德定理).使用分析天平(分度值0.0001 g)分别称试样在空气和液体中的质量,液体为石蜡油 经测量计算,原始和损伤试样的密度分别为 1.793 g/cm<sup>3</sup> 和 1.777 g/cm<sup>3</sup>. 由式(1)可确定损伤变量 $D_A = 4.3\%$ .

## 2 密闭爆发器实验

本实验所用密闭爆发器容积为 $90.75 \text{ cm}^3$  ( $\Phi 34 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ )。将原始和损伤试样分别切成尺寸和数量一样的正方体药块(边长为 $5 \text{ mm}$ , 即厚度), 以同样点火条件和装填密度在密闭爆发器中对其进行定容燃烧。以 $1.1 \text{ g}$  硝化棉作点火药, 点火压力 $10.98 \text{ MPa}$  燃气压力作用于压电传感器, 产生的电信号经放大器放大再输入到微机, 然后由专用软件可以画出试样燃烧过程中的 $p \sim t$  和  $dp/dt \sim t$  曲线。实验条件和结果见表1、图4。

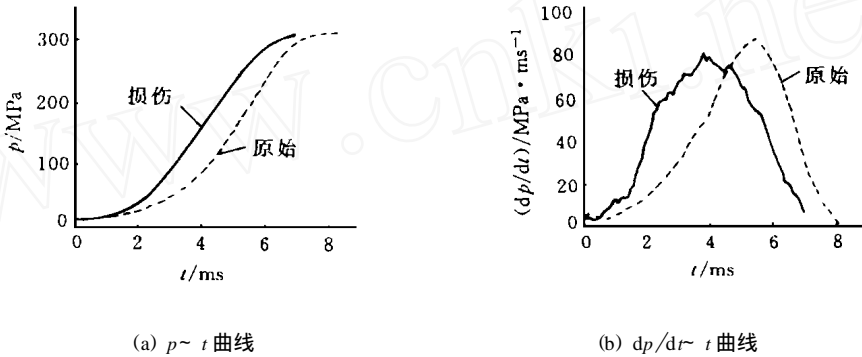


图4 原始和撞击试样的密闭爆发器实验结果

表1 密闭爆发器的实验条件和结果

试样	装药量/g	装填密度/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	$p_m/\text{MPa}$	$t_m/\text{ms}$	$(dp/dt)_m/(\text{MPa} \cdot \text{ms}^{-1})$	$t_{(dp/dt)_m}/\text{ms}$
原始	18.9	0.2	315.36	8.12	86.48	5.40
损伤	18.9	0.2	312.66	6.99	80.10	3.90

实验显示, 同原始试样相比, 损伤试样的燃烧性能发生明显变化, 即损伤试样达到最大压力 $p_m$  和压力增长最大速率 $(dp/dt)_m$  的时间分别缩短了 $13.9\%$  和 $27.7\%$ , 说明推进剂的燃烧速度或燃气生成速率显著增加。从显微观察可知, 由于撞击载荷的作用, 试样中产生一定的裂纹/孔隙, 增加了燃烧表面积, 使燃速增加。在图4(b)中, 损伤试样的 $dp/dt \sim t$  曲线出现脉动转折, 这主要是燃烧面增加的不规则导致的。损伤试样的燃速增加和燃气压力速率的脉动, 在发射时会导致发动机工作异常, 严重时可能引起灾难性事故的发生。

## 3 数值模拟

为了加深对上述现象物理本质的理解, 通过对实验数据的校核, 利用数值模拟展现一些实验尚无法记录的变化过程。该方法可用一维不定常流体动力学方法描写上述燃烧波动过程<sup>[2]</sup>, 它可以计算燃烧场内各参量的变化过程及装药的运动和分析。

### 3.1 基本假设

(1) 硝化棉、推进剂颗粒和燃烧气体产物共处于同一区间, 硝化棉粉和推进剂颗粒的分

布没有间断

(2) 三种介质具有同一程度, 即  $u_g = u_{p1} = u_{p2}$  ( $u_g$ 、 $u_{p1}$ 、 $u_{p2}$  分别为燃烧气体、硝化棉和推进剂颗粒的速度). 这种假定对硝化棉粉是正确的, 因为其粒度平均只有  $10^{-2}$  mm 量级. 对于上述密闭爆发器中推进剂颗粒, 粒度平均也只有  $10^0$  mm 量级, 同样也是一个较好的近似

(3) 假定硝化棉和粒状药的火药力相等, 即  $f_1 = f_2$

根据实验的装药结构和点火过程, 给定燃烧气体、硝化棉和推进剂颗粒的初始密度分布分别为  $\rho_g(x)$ 、 $\rho_{p1}(x)$ 、 $\rho_{p2}(x)$ , 用  $\rho_g$ 、 $\rho_{p1}$ 、 $\rho_{p2}$  表示它们, 并规定:  $k_1 = \rho_{p1}/(\rho_{p1} + \rho_{p2})$ ,  $k_2 = \rho_{p2}/(\rho_{p1} + \rho_{p2})$ , 显然总密度为

$$\rho = \rho_{p1} + \rho_{p2} + \rho_g \quad (3)$$

### 3.2 基本方程

根据上述假定, 可以给出燃烧过程的基本方程

质量守恒

$$\partial/\partial x + \partial u/\partial x = 0 \quad (4)$$

动量守恒

$$\partial u/\partial x + \partial u^2/\partial x^2 + \partial p/\partial x = 0 \quad (5)$$

能量守恒

$$\begin{aligned} \frac{\partial [(k_1\Psi_1 + k_2\Psi_2)e + u^2/2]}{\partial t} + \frac{\partial u [(k_1\Psi_1 + k_2\Psi_2)e + u^2/2]}{\partial x} + \frac{\partial pu}{\partial x} \\ = E_\Delta \rho (k_1 \frac{d\Psi_1}{dt} + k_2 \frac{d\Psi_2}{dt}) \end{aligned} \quad (6)$$

式中:  $p$  为压力;  $u$  为速度;  $\Psi_1$ 、 $\Psi_2$  分别为硝化棉和推进剂的相对燃烧量;  $e$  为气体内能;  $E_\Delta$  为化学能,  $E_\Delta = f/(\gamma - 1)$ ;  $\gamma$  为比热比. 这里, 可不考虑固相的内能

点火药硝化棉的气体生成速率由实验测定, 即

$$\Psi_1 = (1 - \Delta_1/\rho_{p1})/(\Delta_{1f}/p^* + \alpha\Delta_1 - \Delta_1/\rho_{p1}) \quad (7)$$

式中:  $\Delta_1$  和  $\alpha$  分别为硝化棉的装填密度气体余容;  $p^*$  为实测硝化棉气体压力 (Pa), 根据实验, 当  $t < 0.0008$  s 时,  $p^* = 2 \times 10^9(t + t_0)/0.8$ , 当  $t \geq 0.0008$  s 时,  $p^* = 2000 + 2.21 \times 10^{10}(t + t_0 - 0.0008)/3.2$

推进剂的气体生成速率 ( $p = 5.0$  MPa 被点燃)

$$\Psi_2 = \lambda z (1 + \lambda z + \mu z^2) \text{ 或 } d\Psi_2/dt = \lambda (1 + 2\lambda z + 3\mu z^2) dz/dt \quad (8)$$

式中:  $\lambda$ 、 $\mu$  为药形系数,  $z$  为火药相对燃烧厚度, 它由  $dz/dt = p/I_k$  确定

由内能可求得气体温度

$$T = e(\gamma - 1)/R \quad (9)$$

状态方程

$$p[1/\rho - (k_1\Psi_1 + k_2\Psi_2)\alpha - (1 - k_1\Psi_1 - k_2\Psi_2)/\delta] = (k_1\Psi_1 + k_2\Psi_2)RT \quad (10)$$

关于  $k_1$  和  $k_2$  之间的关系

$$\partial/\partial x + \partial u/\partial x = 0 \quad (11)$$

$$k_2 = 1 - k_1 \quad (12)$$

以上基本方程中含有因变量  $\rho, u, p, \epsilon, T, \psi_1, \psi_2, p^*, z, k_1, k_2$  共 11 个, 则方程组是封闭

表2 计算输入参数

参 数	数 值	参 数	数 值
密闭爆发器内腔长/m	0.100	推进剂厚度/mm	5
密闭爆发器内径/m	0.034	比热比	1.25
装药质量/kg	0.0189	燃速指数/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$ )	0.993
装填密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	1840	燃速系数	$1.4 \times 10^{-9}$
余容/( $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ )	0.001	表面点火温度/K	563
火药力/( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	$1.2 \times 10^6$	初始温度/K	298

的方程(4)~(6)是一组偏微分方程, 其余方程可通称为辅助方程。采用MacComack格式编制了程序。计算时输入主要数据见表2。

这里, 为便于与实验结果比较, 选计算压力达到10.98MPa的相应时刻为零。在图5中, 原始试样的计算曲线与实验曲线变化规律相似, 说明该程序可以满足工程估算的要求。从图6及图7中可看出, 在计算初期, 原始试样在密闭爆发器中的压力和孔隙率  $\phi$  分布不均匀, 但很快就趋于均匀了, 随着燃烧的进行, 压力和孔隙率急剧增加, 这与实验相符, 说明燃烧呈急剧加速趋势。

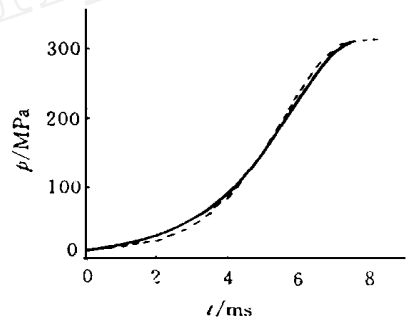


图5 计算和实验的  $p \sim t$  曲线

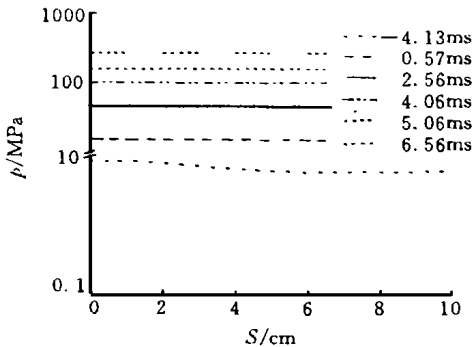


图6 不同时刻  $p \sim s$  的计算曲线

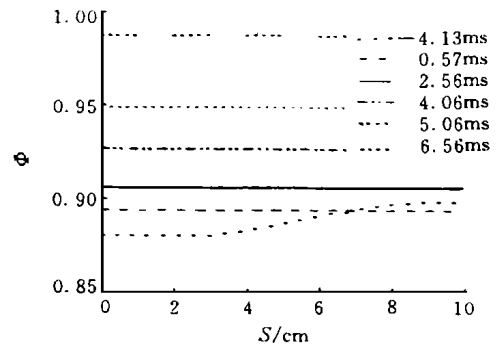


图7 不同时刻  $\phi \sim s$  的计算曲线

## 4 结论

从上述分析可知, 损伤能引起推进剂燃烧性能的变化, 导致不安全因素的增加。目前, 在 高能推进剂研制过程中, 为提高比冲, 大量添加高能炸药, 如HM X、RDX。这些高能炸药本

身就具有较高的冲击波和机械感度。损伤不仅能增加燃烧表面积,提高燃速;同时,增加热点源,提高冲击波感度,这会导致高能推进剂在发射时燃烧转爆轰(DDT)事故的发生。所以,在研究推进剂的安全性应用中,必须重视它在不同条件下的损伤行为及其对燃烧稳定影响的研究。

### 参 考 文 献

- 1 勒迈特著,倪金刚,陶春虎译.损伤力学教程.北京:科学出版社,1996
- 2 王升晨,周彦煌.实用两相流内弹道学.北京:兵器工业出版社,1990

## THE EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY ON DAMAGE OF A PROPELLANT AND ITS COMBUSTION

Zhang Taihua    Wang Shiyang    Liu Peide

State Key Laboratory of Nonlinear Mechanics (LNM), Institute of  
Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100080  
Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an, 710065

**Abstract** In order to study the effect of damage on the dangerous properties in the NEPE propellant, a series of experiments, including the damage production and observation and measurement, closed-bomb test, have been performed. At the same time, the one-dimensional, two-phase flow model was used to analyze the combustion. The results indicate that numerical simulation is in good agreement with the closed-bomb test.

**Key words** high-energy propellant, damage, combustion, two-phase flow