

# 爆轰驱动带有附加质量的筒壳大变形动力学分析

范亚夫<sup>1,2</sup>, 段祝平<sup>1</sup>, 陈捷<sup>2</sup>, 马岳<sup>1</sup>

(1. 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;

2. 中国兵器工业 52 研究所, 内蒙古 包头 014034)

**摘要:** 依据大变形理论, 考虑到筒壳和动能杆的冲击接触并视动能杆为附加质量, 求解了内爆炸载荷下具有附加质量的筒壳径向膨胀的动力学响应。给出了瞬态的速度场分布及筒壳断裂时杆和壳体的速度, 计算结果与实验结果吻合。

**关键词:** 爆轰驱动; 筒壳; 动能杆; 大变形

## 1 引言

实验和理论分析均表明, 在内爆炸载荷作用下壳体将以  $10^3 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$  应变率向外膨胀, 视壳体材料的强度和韧性不同大约要经历  $7 \sim 10 \mu\text{s}$  壳体才破裂。因此, 传统意义上的小变形理论已不在适用, 必须采用大变形理论进行分析。

## 2 具有附加质量筒壳膨胀速度场分布的解析解

### 2.1 筒壳径向运动微分方程导出

考虑到所要求解的问题与时间  $t$  相关及轴对称变形的特点, 给出下面的映射函数

$$r = f(R, t), \theta = \Theta, z = Z \quad (1)$$

通过不计体力的 Cauchy 第一运动定理, 并利用变形梯度张量  $F$  的 Jacobi 行列式和材料的不可压缩条件, 可以获得壳体径向膨胀的速度和加速度, 进而得到壳体的径向运动方程

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = \rho_0 [(a\ddot{a} + \dot{a}^2)r^{-1} - a^2 \dot{a}^2 r^{-3}] \quad (2)$$

### 2.2 边界条件

附加质量圆筒膨胀的边界条件如图 1 所示。

$$\begin{cases} \sigma_r \Big|_{r=a} = -p, \\ \sigma_r \Big|_{r=b} = -\frac{p_k}{2} [\cos(n\theta) + 1] \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \theta = \frac{2k\pi}{n} & k = 0, 1, 2, \dots, n-1, \sigma_r(\theta) \Big|_{r=b} = -p_k \\ \theta = \frac{(2k+1)\pi}{n} & k = 0, 1, 2, \dots, n-1, \sigma_r(\theta) \Big|_{r=b} = 0 \end{cases}$$

式中:  $p$  为作用于筒壳内壁的瞬态爆轰压力,  $p_k$  为壳体与杆的初始冲击接触压力。  $n$  为动能杆数。  $0 \leq \theta_k \leq 2\pi/n$ 。

于是, 爆轰驱动筒壳进而推动与之接触的动能杆可归结为一个考虑边界条件(3)、求解微分方程(2)的内爆炸载荷下圆筒膨胀循环轴对称的边值问题。

### 2.3 壳体破碎时的半径和速度

利用 von Mises 屈服准则和瞬态爆轰模型可以得到具有附加质量筒壳膨胀的速度场分布。同时,

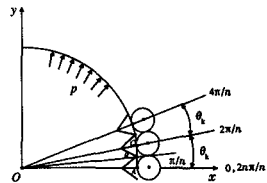


图 1 具有附加质量圆筒膨胀的边界条件

依据 Taylor 断裂判据,可以得到壳体破裂时的半径,进而得到壳体破裂时的速度

$$\dot{a}_n = \left\{ \frac{-\rho_k [\cos(n\theta) + 1]}{\rho_0 \left( \frac{B^2}{A^2} - 1 \right)} \left[ \left( \frac{\sqrt{3} \rho_0 D_j}{16\sigma} \right)^{\frac{1}{2}} - 1 \right] + \frac{\rho_0 D_j}{8\rho_0 \left( \frac{B^2}{A^2} - 1 \right)} \left[ 1 - \left( \frac{16\sqrt{3}\sigma}{3\rho_0 D_j} \right)^{\frac{2}{3}} \right] - \frac{2\sqrt{3}\sigma}{9\rho_0} \ln \left( \frac{\sqrt{3} \rho_0 D_j}{16\sigma} \right) \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

#### 2.4 动压力 $p_k$ 的确定

冲击接触实际上是个相对撞击速度的概念而且弹性变形能只占运动过程中总能量的百分之几,考虑到 Johnson 损伤数的物理内涵及强调“初始撞击速度”的要求,取初始撞击速度的上限值  $v_{pc} = \sqrt{\sigma_p/\rho}$  作为筒壳和动能杆撞击的初速<sup>[1]</sup>。视筒壳和动能杆为 Hertz 接触<sup>[2]</sup>,取最大值为  $p_k$  值:

$$p_k = p_{max} = 0.59 \sqrt{\frac{2p'}{\Phi} \left( \frac{1}{1/E_1 + 1/E_2} \right)} \quad (5)$$

式中:  $p'$  为单位长度上的力;  $\Phi$  为杆直径;  $E_1$  和  $E_2$  分别为壳体和动能杆的弹性模量。

### 3 计算结果和模拟实验结果的比较

动能杆为 10 钢,筒壳是经两种热处理工艺的 Ti-6Al-4V(TC4)材料。对(4)式修正后并利用(5)式,代入 10 钢的动态屈服强度  $\sigma_s = 220\text{MPa}$ ; TC4 材料和圆筒的有关数据  $A = 45.0\text{mm}$ ,  $B = 47.5\text{mm}$ ,  $A_r = 18\text{mm}$ , TC4-A:  $\sigma_s = 800\text{MPa}$ , TC4-B:  $\sigma_s = 1200\text{MPa}$ ,  $\rho_0 = 4510\text{kg/m}^3$ ; 炸药 T/R(35/65); 爆速  $D_j = 7967\text{m/s}$ , 炸药密度  $\rho_{00} = 1714\text{kg/m}^3$ 。分别得到两种热处理工艺 TC4 壳体在图 1 轴对称点上的速度:

TC4-A A 点  $\theta = 0$ ,  $\dot{a}_{IA} = 740\text{m/s}$ ; B 点  $\theta = \pi/n$ ,  $\dot{a}_{IB} = 3440\text{m/s}$ ; C 点  $\theta = 2\pi/n$ ,  $\dot{a}_{IC} = 740\text{m/s}$ 。

TC4-B A 点  $\theta = 0$ ,  $\dot{a}_{IA} = 1460\text{m/s}$ ; B 点  $\theta = \pi/n$ ,  $\dot{a}_{IB} = 3260\text{m/s}$ ; C 点  $\theta = 2\pi/n$ ,  $\dot{a}_{IC} = 1460\text{m/s}$ 。

### 4 结论

上述计算结果给出的是在一个完整的循环对称周期内几个轴对称点上的值,从中可以看到由于动能杆的惯性阻力,使得壳体与动能杆接触处的速度降低,此结论已被数值分析结果所证实。而杆间质点速度计算结果与图 2 给出的战斗部模拟实验高速摄影照片杆间溢出速度基本吻合。同时注意到,由于 TC4-B 屈服强度的提高,导致抵抗变形的能力增强,从而使得在壳体破碎时动能杆获得较高的速度,

而两杆间隙处的壳体材料速度较 TC4-A 降低。这给了我们一种启示:作为壳体材料的 TC4 只能适当降低其强度并努力控制破片的形状才是使动能杆获得较大设计初速的正确技术途径。

#### 参考文献:

- [1] 马晓青,韩峰. 高速碰撞动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998. 228—230.
- [2] Lloyd R M. Conventional warhead systems physics and engineering design[M]. USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc, 1998. 144—149.

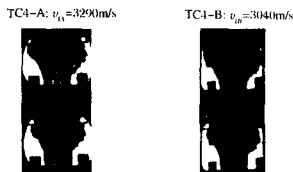


图 2 用于数据处理的高速摄影照片