

文章编号: 1001-1455 (2000)04-0348-05

炸药爆轰产物驱动不可压缩 刚粘塑性柱壳的运动*

谭多望, 孙承纬, 王彦平

(中物院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理实验室, 四川 绵阳 621900)

摘要: 从质量和动量守恒关系出发, 结合炸药爆轰产物压力剖面的分析和假设, 导出了不可压缩刚粘塑性柱壳在柱面散心和聚心爆轰产物推动作用下的运动方程。应用该方程式计算爆轰驱动柱壳的运动与实验结果及动力有限元程序 DYNA2D 的数值模拟结果十分接近, 说明散心爆轰波场合波后产物流场可用柱面 Taylor 波的近似解合理描述, 有限初始半径聚心爆轰波后产物流场可用平面 Taylor 波近似描述。

关键词: 爆轰驱动; 刚粘塑性; 柱壳

中图分类号: O383 文献标识码: A

1 引 言

球、柱壳爆轰驱动是战斗部设计、爆炸焊接等方面的基础问题, 工程上常用 Gurney 方法进行计算。Gurney 方法假设炸药瞬时爆轰和壳体瞬时加速, 计算简单, 但不能计算壳体加速过程。后来孙承纬等通过求解爆轰波流场分布, 在刚性飞片的假设条件下, 推导了球、柱壳运动的近似解。我们在此基础上, 考虑壳体变形和塑性效应, 导出了金属球壳在球面散心和聚心爆轰作用下运动的解析方程式, 其计算结果与实验和数值模拟计算结果吻合, 为工程计算提供了一种有效方法^[1]。在本文中以不可压缩连续介质模型及比较精确的产物流场, 近似求解柱壳在柱面散心或聚心爆轰作用下的加速运动。

爆轰驱动时, 壳体材料的弹塑性对运动初期的响应以及运动后期的渐近状态有一定影响, 但对平均意义下的爆轰驱动运动影响不大。因此, 作为不可压缩的刚粘塑性材料处理, 包括流动应力与应变率有关的情况, 只要不考虑与应变历史有关情形及卸载问题, 壳体的一维运动可以用一组常微分方程式足够精确地表示。这种方法早在 60 年代已有俄国学者提出, 但至今还局限于较简单的本构关系。

对于爆轰驱动而言, 更为重要的是产物流场及其与壳体运动相互作用的描述。这方面常用的基本假定是产物等熵指数 $k=3$ 的简单波流场, 这时可根据壳体未运动时产物流场的函数形式, 给出推动壳体运动的压力函数形式。平面一维爆轰驱动刚性飞片的解都是这样做的^[2~3]。在本文中, 把这个基本假定推广到柱面散心和聚心爆轰驱动问题, 为此首先要给出散心爆轰波或有限半径聚心爆轰波后产物流场的近似解。散心爆轰场合, 我们利用以前得到的

* 收稿日期: 1999-09-09; 修回日期: 2000-01-19

作者简介: 谭多望 (1967—), 男, 博士研究生, 副研究员。

近似解析解,产物流场可表示为拟简单波形式,并可用柱面 Taylor 波的近似解合理描述。类似于散心爆轰波,这些近似解都认为聚心波后产物流场中 Riemann 不变量 β 是主要的,另一 Riemann 不变量 α 相对变化较小。另外,根据我们所作的渐近分析,聚心波阵面上产物压力及粒子速度随其半径变化不大,所以可合理地假定聚心爆轰驱动时波后产物流场可以用平面 Taylor 波近似。

综合壳体运动方程和产物压力的函数形式,我们建立了散心或聚心爆轰驱动不可压缩刚粘塑性柱壳运动的理论模型,经与实验及数值模拟结果比较,表明这个模型在广泛参数范围上是符合实际的,是工程应用和理论估算的一种有效手段。

2 基本假设

无限长的圆柱形壳体内装满炸药,炸药在对称轴线处起爆,即为柱面散心爆轰驱动柱壳的膨胀运动;在无限长的圆柱形壳体外轴对称地布置一层等厚炸药,炸药外表面同时起爆,即为柱面聚心爆轰驱动柱壳的收缩运动,如图 1 所示。

以柱壳对称轴线为 z 轴建立圆柱坐标系 (r, θ, z) ,并将物理量无量纲化,以简化求解过程。无量纲方法是长度因子取柱壳初始内半径 r_{10} ,速度因子取炸药爆速 D ,密度因子取炸药密度 ρ_e ,这样柱壳初始内半径为 1, r_{20} 为无量纲的柱壳初始外半径, r_{30} 为聚心爆轰驱动时无量纲的炸药外表面初始半径。为建立壳体运动方程,我们作如下假设。

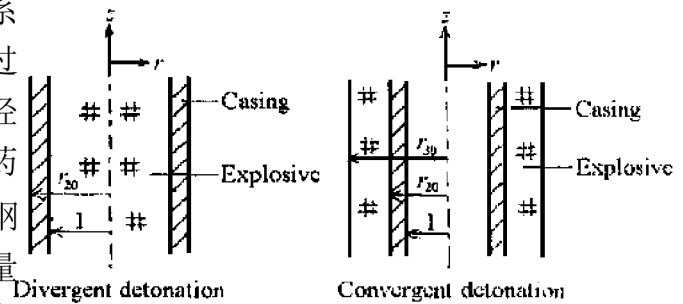


图 1 柱面爆轰驱动柱壳运动

(1) 由于爆炸的作用力很大,可以不考虑壳体的弹性变形,认为壳体在爆轰产物的作用下瞬间进入塑性状态,材料模型采用理想刚粘塑性模型,其本构关系为

$$\sigma_{\theta} - \sigma_r = \text{sgn}(r) \cdot 2K - 4\mu \frac{\partial v}{\partial r} \tag{1}$$

式中: σ_r 、 σ_{θ} 分别为径向和环向应力(以拉应力为正), K 为材料常数,其值为单向拉伸时材料屈服极限的一半, μ 为粘性系数, v 为壳体质点径向速度, r 为壳体质点径向坐标;

- (2) 壳体材料是不可压缩的,在爆轰产物的作用下不发生层裂和破裂;
- (3) 主要研究壳体变形运动,忽略应力波在壳体内部的传播、反射等细微过程;
- (4) 爆轰产物是等熵的,爆轰波到达壳体后反射弱冲击波。

3 壳体运动方程

对于不可压缩柱壳, Euler 形式的运动方程为

$$\frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} = 0 \tag{2}$$

$$\rho_m \left(\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial r} \right) = \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_{\theta}}{r} \tag{3}$$

式中: ρ_m 是壳体密度。对式(2)积分,得到速度分布的通解

$$v(r, t) = c(t)/r \quad (4)$$

式中: $c(t)$ 是任意的时间函数。将式(1)和(4)代入式(3), 并从 r_1 到 r_2 积分, 得到

$$\begin{aligned} & \rho_m \frac{dc(t)}{dt} \ln \frac{r_2}{r_1} + \frac{1}{2} \rho_m [v^2(r_2) - v^2(r_1)] = \\ & \sigma_r(r_2) - \sigma_r(r_1) + \text{sgn}(r) \cdot 2K \ln \frac{r_2}{r_1} - 2\mu c(t) \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

对式(4)微分, 得到

$$\dot{c} = \dot{r}^2 + r \ddot{r} \quad (6)$$

由质量守恒定律和材料不可压缩假设条件, 有关系式

$$r_2^2 - r_1^2 = r_{20}^2 - 1 \quad (7)$$

将式(6)和(7)代入式(5), 并令 $r = r_1$, 得到柱壳内表面运动方程

$$\begin{aligned} & \rho_m r_1 \ddot{r}_1 \ln \frac{r_2}{r_1} + \rho_m \left[\ln \frac{r_2}{r_2} - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{r_1^2}{r_2^2} \right) \right] \dot{r}_1^2 = \\ & \sigma_r(r_2) - \sigma_r(r_1) + \text{sgn}(r_1) \cdot 2K \ln \frac{r_2}{r_1} + 2\mu \left(1 - \frac{r_1^2}{r_2^2} \right) \frac{\dot{r}_1}{r_1} \end{aligned} \quad (8)$$

如果爆轰产物作用于壳体内外表面的应力 $\sigma_r(r_1)$ 和 $\sigma_r(r_2)$ 只与 r_1, r_2 和时间 t 有关, 上式可降阶为以壳体内表面速度平方为未知数的一阶常微分方程组, 得到封闭形式的解。散心爆轰驱动时, 求解的边界条件和初始条件为

$$\sigma_r(r_2) = 0 \quad (9)$$

$$r_1 = 1, \quad \dot{r}_1 = 0 \quad \text{当 } t = 1 \text{ 时} \quad (10)$$

聚心爆轰驱动时, 求解的边界条件和初始条件为

$$\sigma_r(r_1) = 0 \quad (11)$$

$$r_1 = 1, \quad \dot{r}_1 = 0 \quad \text{当 } t = r_{30} - r_{20} \text{ 时} \quad (12)$$

4 爆轰产物作用于壳体表面的应力

据我们的渐近分析, 散心爆轰时产物流场可用柱面 Taylor 波近似描述, 有限初始半径聚心爆轰驱动时产物流场可以用平面 Taylor 波近似描述, 并导出了柱面 Taylor 波的一个高精度近似解^[4~5]。因此, 散心爆轰驱动时柱壳内表面处的径向应力

$$\sigma_r(r_1) = -\frac{1}{k+1} \left(\frac{k^2-1}{2k} \right)^{\frac{2k}{k-1}} (\alpha - \dot{r}_1)^{\frac{2k}{k-1}} \quad (13)$$

$$\alpha = \begin{cases} \frac{3k-1}{k^2-1} - \frac{2}{k+1} \sqrt{\frac{2k}{k+1} \left(1 - \frac{r_1}{t} \right)} + \frac{4}{k+1} \left(\sqrt{\frac{k}{k+1}} - 1 \right) \left(1 - \frac{r_1}{t} \right) & t \leq 2r_1 \\ \frac{1}{k-1} & t > 2r_1 \end{cases} \quad (14)$$

有限初始半径聚心爆轰驱动时柱壳外表面处的径向应力

$$\sigma_r(r_2) = \frac{1}{k+1} \left(\frac{k^2-1}{2k} \right)^{\frac{2k}{k-1}} (\alpha + \dot{r}_2)^{\frac{2k}{k-1}} \quad (15)$$

$$\alpha = (r_{30} - r_{20})/t \quad (16)$$

5 计算结果及其分析

图 2 为散心爆轰时计算结果与我们的实验结果的比较。实验装置如图 3 所示, 柱壳材料为 20 钢, 密度为 $7.8\text{g}/\text{cm}^3$, 初始内外半径分别为 63.0 和 68.0mm, 装药为 RHT-901 (TNT/RDX = 40/60) 炸药, 密度为 $1.7\text{g}/\text{cm}^3$, $D=7.9\text{km}/\text{s}$, $k=2.7$ 。装药被柱面起爆器 (直径为 36mm) 起爆, 产生柱面散心爆轰波, 驱动壳体运动。实验中用高速摄影技术测量壳体外表面的运动。运动方程采用四阶 Runge-Kutta 法求解, 计算时忽略柱面起爆器的尺寸, $K=0.3\text{GPa}$, $\mu=3\text{kPa}\cdot\text{s}$ 。从图中可看出, 计算结果与实验结果符合。

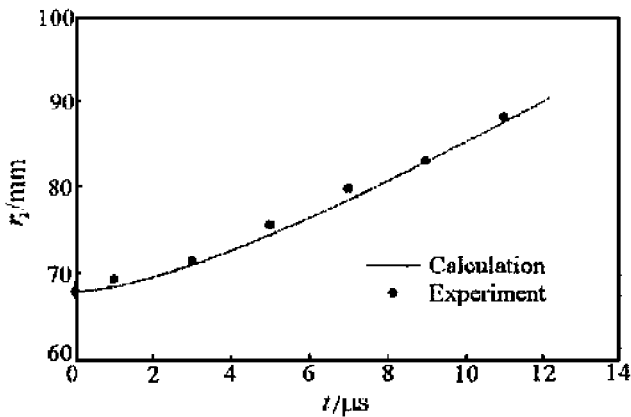


图 2 散心爆轰时计算结果与实验结果的比较
Fig.2 The comparison between the calculated result and the experimental result under divergent detonation

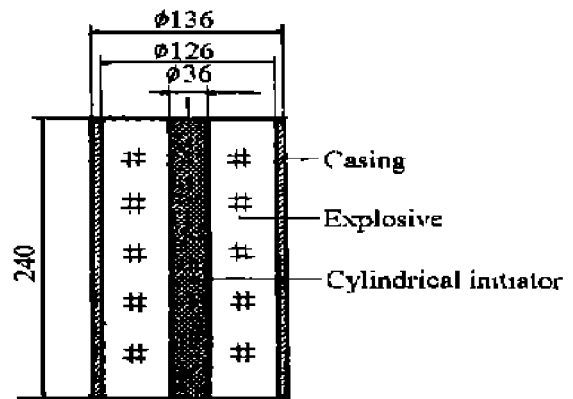


图 3 柱面散心爆轰驱动柱壳运动的实验装置
Fig.3 Casing driven by the cylindrical divergent detonation

我们用动力有限元程序 DYNA2D 对散心和聚心爆轰驱动柱壳进行了数值模拟计算, 并与运动方程的计算结果进行了比较。在数值模拟中, 壳体采用流体弹塑性模型和 Grüneisen 物态方程, 爆轰产物采用 JWL 物态方程。散心爆轰驱动的结果见图 4, 聚心爆轰驱动的结果见图 5。图中参量是无量纲参量, 光滑曲线是运动方程的计算结果, 振荡曲线是数值模拟结果, η 是炸药质量与壳体质量之比。比较解析计算和数值模拟结果可知, 本文模型较准确地反映了壳体运动规律以及壳体运动后期外表面反弹、内表面坍塌等情况。聚心爆轰驱动时, 柱壳内表面加速后期偏离数值模拟较大, 主要由假设壳体材料不可压缩所致, 因为 $r_1 = r_2 r_2 / r_1$, 当 $r_1 \rightarrow 0$ 时, 内表面速度 r_1 很快增加。

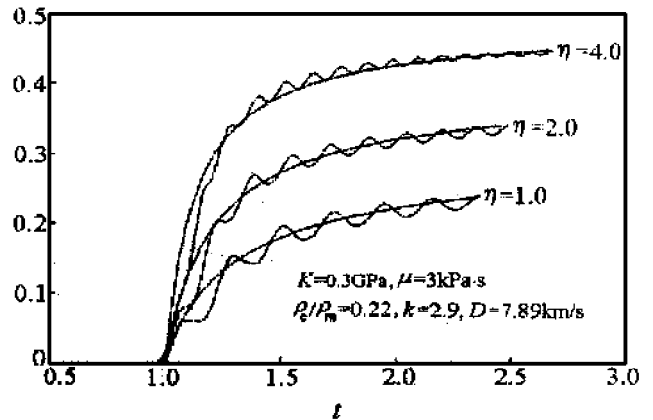
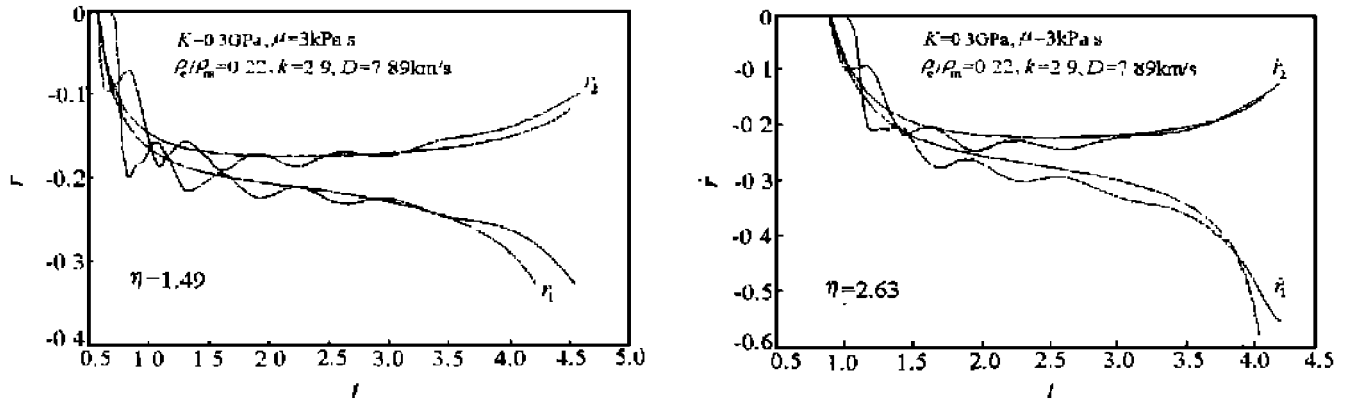


图 4 散心爆轰时 r_1-t 曲线
Fig.4 The r_1-t relation under divergent detonation

通过与实验结果和数值模拟计算结果的比较, 说明本文给出的运动方程在较大质量范围内是适用的, 为工程计算和理论分析提供了一种有效的近似方法。

图 5 聚心爆轰时 $r-t$ 曲线Fig. 5 The $r-t$ relation under convergent detonation

参考文献:

- [1] 谭多望, 孙承纬. 炸药爆轰产物驱动刚塑性球壳的加速运动 [J]. 高压物理学报, 1998, 12(3): 218—222.
- [2] Aziz A K, Huiwits H, Sternberg H M. Energy Transfer to a Piston Detonation Loading [J]. Phys of Fluids, 1961, 4(3): 380—384.
- [3] Станюкович К П. НеУстановив шиеся Движения Спло шной СРеды [М]. Москва: ГИИЛ, 1955.
- [4] 孙承纬. 球、柱面散心爆轰波波后产物运动的近似解 [A]. 孙承纬. 爆轰研究论文集·第一卷 [C]. 绵阳: 中物院流体物理研究所, 1993. 273—280.
- [5] 孙承纬. 一维爆轰产物对刚性飞片的抛射运动 [A]. 孙承纬. 爆轰研究论文集·第二卷 [C]. 绵阳: 中物院流体物理研究所, 1993. 69—79.

The Motion of an Incompressible Rigid-visco-plastic Cylinder Driven by Detonation Products of Explosives

TAN Duo-wang, SUN Cheng-wei, WANG Yan-ping

(Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research,
Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang Sichuan 621900, China)

Abstract: Based on the analysis of the pressure profile of the detonation products flow, an analytic solution is derived to calculate the motion of an incompressible rigid-visco-plastic cylinder driven by the divergent or convergent detonation of an explosive. The solution was checked against the experimental results and the numerical results performed with the finite element hydrocode DYNA2D. The good agreement indicates that the cylindrical divergent flow and convergent flow can be approximately evaluated with cylindrical Taylor wave and planar Taylor wave respectively.

Key words: detonation driving; rigid-visco-plasticity; cylinder