

文章编号: 1000-0887(2006) 02-0211-06

球形塑性薄壳在平头圆柱体冲击下 贯穿过程的研究*

宁建国, 宋卫东

(爆炸科学与技术国家重点实验室, 北京理工大学, 北京 100081)

(程昌钧推荐)

摘要: 对球形塑性壳在平头圆柱体冲击下的动力贯穿行为进行了分析。通过引入等度量变换, 给出了壳体的变形模态。在此基础上对球壳在平头圆柱体撞击下的贯穿机制进行了分析研究, 给出了贯穿模型, 由此结合 Hamilton 原理, 导出了运动方程组。采用 Runge-Kutta 方法求解了该方程组, 最后分别给出了贯穿时间、弹体初速度、残余窝陷半径、弹体初速度、贯穿后弹体剩余速度、弹体初速度的关系曲线。

关键词: 薄壳; 冲击; 贯穿

中图分类号: O346 文献标识码: A

引 言

固体的侵彻和贯穿问题, 长期以来一直在军事方面具有十分重要的意义。近年来, 随着科学技术的发展, 穿甲研究又在许多工业应用中得到重视。如原子反应堆高压容器的完整性和航空发动机的涡轮叶片被飞鸟撞击后的生存性等。无论在民用方面, 还是在军用方面, 金属薄壳结构是广泛使用的一类结构元件, 然而与平板^[1~3]相比, 对于壳体结构穿甲的研究是相当少的^[4~6]。Pogorelov^[7]对壳体的准静态行为进行了研究, 注意到球壳在中心集中力作用下的变形可由一等距变形或由一翻转区域得到。利用该变形模态, Pogorelov 求解了弹性球壳在中心集中力作用下的大变形。Zhong 和 Ruiz^[8]研究了球壳在平头圆柱体冲击下的破坏行为, 假定球壳在冲击作用下形成一正多面体的窝陷, 然后由能量平衡给出了中心残余挠度和弹体初始动能之间的关系式。杨桂通等人^[9]对固支扁球壳在撞击作用下的动力行为, 进行了较系统的研究。从实验中可以观察到壳体变形所形成的窝陷不能无限制的向壳体边界发展, 当子弹速度大到一定值时, 壳体便被穿透了, 并且壳体的永久变形均是一窝陷, 这时窝陷部分的曲率是壳体未变形时的负值。也就是说当平头圆柱体以很小的速度冲击球形薄壳的最高点时, 壳体将在载荷作用点周围形成一近似等距变形(纯弯曲)的窝陷。但当子弹速度比较大时, 需要考虑弹体作用点周围壳体的剪切变形, 即要研究壳体的贯穿问题。宁建国等人^[10, 11]引入等度量变

* 收稿日期: 2005_01_23; 修订日期: 2005_10_29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(90305018)

作者简介: 宁建国(1963—), 男, 山西太原人, 教授, 博士(联系人: Tel: + 86_10_68912762; Fax: + 86_10_68915233; E_mail: jgning@bit.edu.cn)。

换给出了壳体的变形模态,采用能量的方法对壳体在冲击载荷作用下的大变形动态响应进行了分析。

本文基于文献[10,11]关于壳体变形的假定,给出一个描述贯穿过程的壳体破坏模型。进而利用 Hamilton 原理,导出了运动控制方程,并利用 Runge_Kutta 方法求解了该方程。给出了贯穿时间、残余窝陷半径以及贯穿后弹体剩余速度等随弹体初速度的变化关系曲线。

1 贯穿的物理机制与数学描述

研究穿甲力学问题时,不可避免的要使用全部连续介质力学方程,其中最复杂的往往是材料的本构方程。这些方程一般都是非线性的,用分析方法进行积分求解几乎是不可能的。因此人们往往集中研究某一现象,例如,弹坑形成,层裂,花瓣型破坏等。针对这种现象的特点引入简化假定,从而把微分方程化为一维或二维的,以便求解。此外,几乎所有分析都采用了一些附加的经验结论或一些尚待测量的参量,为简化计算本文采用如下假定:

- 1) 采用弱相互作用的屈服条件,即

$$N_{\theta} = N_r = N_0 = \sigma_0 h, \quad (1)$$

$$M_{\theta} = M_r = M_0 = \frac{1}{4} \sigma_0 h^2, \quad (2)$$

$$Q_{\theta} = Q_r = Q_0 = \frac{1}{2} \sigma_0 h, \quad (3)$$

其中, σ_0 为材料的屈服应力, h 为壳的厚度;

- 2) 弹体、塞柱为刚体,变形不计;
- 3) 摩擦不考虑;
- 4) 侵彻开始后,弹体与塞柱以同一速度运动。

1.1 贯穿模型

考虑图 1 所示的球形壳,其曲率半径为 R ,厚度为 h ,底圆半径为 r_0 ,密度为 ρ_0 ,该球壳在其顶部受质量为 M 和截面半径为 r 的平头圆柱体的正碰撞,其初速度为 v_0 。下面的任务是研究这样一个球壳的贯穿过程。

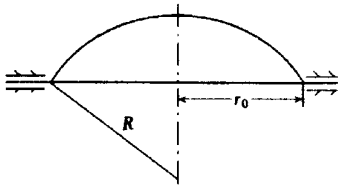


图 1 球壳的几何尺寸

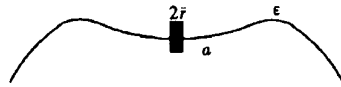


图 2 球壳的贯穿模型

假定该球壳的贯穿模型如图 2 所示,这里的窝陷和棱区的变形模型与文献[10]一致。令 $\omega_1(t)$ 表示弹体和塞柱的位移,于是窝陷的位移为:

$$\omega_2(r, t) = 2f \left[1 - \frac{r^2}{a^2} \right] + \frac{a\varepsilon}{R} - 2f_1 \quad (r \leq r \leq a), \quad (4)$$

其中, $f = a^2/(2R)$, $f_1 = r^2/(2R)$, 假定棱区宽度 ε 是一个小量。进一步有棱区的位移:

$$\omega_3(r, t) = \frac{1}{\varepsilon} (\sqrt{2Rf} + \varepsilon - r)^2 \sqrt{\frac{2f}{R}} \quad (a \leq r \leq a + \varepsilon). \quad (5)$$

再令 $\omega_{20} = 2f - 2f_1$, 那么 ω_{20} 是球壳在 $r = r$ 处的位移。利用公式(4)和(5),则可给出速度模型为:

$$\frac{d\omega_2}{dt} = \left[2 + \frac{\varepsilon}{\sqrt{2R} \left(\frac{\omega_{20}}{2} + f_1 \right)^{1/2}} \right] \frac{d\omega_{20}}{dt}, \quad (6)$$

$$\frac{d\omega_3}{dt} = \left\{ \frac{L \sqrt{2R} \left(\frac{\omega_{20}}{2} + f_1 \right)^{1/2} + \varepsilon - r}{\varepsilon \sqrt{2R} \left(\frac{\omega_{20}}{2} + f_1 \right)^{1/2}} + \frac{2}{3} \left[\sqrt{2R} \left(\frac{\omega_{20}}{2} + f_1 \right)^{1/2} + \varepsilon - r \right] \right\} \frac{d\omega_{20}}{dt}. \quad (7)$$

这样球壳的动能为:

$$T_2 = \left\{ \frac{\pi h \rho}{8} \left[2R \left(\frac{\omega_{20}}{2} + f_1 \right) - r^2 \right] \left[2 + \frac{\varepsilon}{\sqrt{2R} \left(\frac{\omega_{20}}{2} + f_1 \right)^{1/2}} \right] + \frac{\pi h \rho}{12} \left[\frac{\varepsilon^3}{4} + \varepsilon^2 \sqrt{R \left(\frac{\omega_{20}}{2} + f_1 \right)} \right] \frac{1}{2R \left(\frac{\omega_{20}}{2} + f_1 \right)^{1/2}} + \left[\varepsilon^2 + 2\varepsilon \sqrt{2R \left(\frac{\omega_{20}}{2} + f_1 \right)} \right] \right\} \omega_{20}^2. \quad (8)$$

弹体和塞柱的动能之和为:

$$T_1 = (M + \pi \rho h r^2) \omega_{10}^2 / 2. \quad (9)$$

由文献[10]前一部分的讨论知,球壳的塑性变形能为:

$$U_1 = \pi h^2 \sigma_0 \sqrt{2R} \left[2 \sqrt{R \left(\frac{\omega_{20}}{2} + f_1 \right)} + \varepsilon \right] \left(\frac{\omega_{20}}{2} + f_1 \right)^{1/2} \sqrt{R} + \pi h^2 \sigma_0 \sqrt{2R} \left[\sqrt{2R \left(\frac{\omega_{20}}{2} + f_1 \right)} + \varepsilon \right] \left[2\varepsilon \sqrt{2R \left(\frac{\omega_{20}}{2} + f_1 \right)} + \varepsilon^2 \left(\frac{\omega_{20}}{2} + f_1 \right)^{1/2} \right] \sqrt{3R^2 - \pi h^2 r^2 \sigma_0 / R}. \quad (10)$$

下面,我们将计算塞柱在运动过程中的剪切耗散能。在 $r = r$ 处,塞柱和壳体之间的相对位移为

$$\Delta = \omega_{10} - \omega_{20}, \quad (11)$$

而它们之间的接触厚度为

$$\delta = h - \Delta = h - (\omega_{10} - \omega_{20}), \quad (12)$$

于是剪力密度为

$$Q = \frac{Q_0 \delta}{h}, \quad (13)$$

进而,剪力所耗散的能量为

$$U_2 = \pi r^2 Q_0 h \left\{ 1 - [1 - (\omega_{10} - \omega_{20})/h]^2 \right\}. \quad (14)$$

这样下面就可以导出壳体贯穿的运动控制方程了。

1.2 控制方程

令

$$L = T - U, \quad (15)$$

其中, $T = T_1 + T_2$, $U = U_1 + U_2$ 。由 Hamilton 原理,我们有:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\omega}_{10}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \omega_{10}} = 0, \quad (16)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\omega}_{20}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \omega_{20}} = 0. \quad (17)$$

于是,经过比较复杂的数学运算后,有

$$(M + \pi h \rho^2) \ddot{\omega}_{10} + 2\pi r Q_0 \left(1 - \frac{\omega_{10} - \omega_{20}}{h} \right) = 0, \quad (18)$$

$$A(\omega_{20}) \ddot{\omega}_{20} + B(\omega_{20}) \dot{\omega}_{20} + C(\omega_{10}, \omega_{20}) = 0, \quad (19)$$

这里,

$$A(\omega_{20}) = 2 \left\{ \frac{\pi h \rho}{8} [R(\omega_{20} + 2f_1) - r^2] + \left[2 + \frac{\varepsilon}{\sqrt{R(\omega_{20} + 2f_1)}} \right]^2 + \frac{\pi h \rho}{12} \left[\left(\frac{\varepsilon^3}{4} + \varepsilon^2 \sqrt{R(\omega_{20} + 2f_1)} \right) \sqrt{R(\omega_{20} + 2f_1) + \varepsilon^2 + 3\varepsilon \sqrt{R(\omega_{20} + 2f_1)}} \right] \right\},$$

$$B(\omega_{20}) = 2 \left\{ \frac{\pi h \rho}{8} \left[2 + \frac{\varepsilon}{\sqrt{R(\omega_{20} + 2f_1)}} \right]^2 - \frac{\pi h \rho}{16 \sqrt{2R}} [R(\omega_{20} + 2f_1) - r^2] \left[2 + \frac{\varepsilon}{\sqrt{R(\omega_{20} + 2f_1)}} \right] \left(\frac{\omega_{20}}{2} + f_1 \right)^{-3/2} + \frac{\pi h \rho}{4} \left[\frac{\varepsilon^2}{6(\omega_{20} + 2f_1)} \frac{(\varepsilon^3/24 + \varepsilon^2(\omega_{20} + 2f_1)^{1/2}(6\sqrt{R})^{-1})}{\sqrt{R(\omega_{20} + 2f_1)}^{3/2}} + \frac{\varepsilon \sqrt{R}}{2(\omega_{20} + 2f_1)^{1/2}} \right] \right\},$$

$$C(\omega_{10}, \omega_{20}) = \pi \rho_0 h^2 \left[1 + \left(1 + \frac{\varepsilon}{2 \sqrt{R(\omega_{20} + 2f_1)}} \right) + \frac{\pi \rho_0 h}{3R^2} \left[\frac{R}{2} (2\varepsilon \sqrt{R(\omega_{20} + 2f_1)}) + \varepsilon^2 + \varepsilon R (\sqrt{R(\omega_{20} + 2f_1)} + \varepsilon) + \frac{\sqrt{2R}}{4} \left(2R + \frac{\varepsilon}{\sqrt{\omega_{20}/2 + f_1}} \right) \cdot (2\varepsilon \sqrt{R(\omega_{20} + 2f_1)} + \varepsilon^2) \right] - 2\pi r Q_0 \left(1 - \frac{\omega_{10} - \omega_{20}}{h} \right) \right].$$

方程(18)和(19)就是所要求的球壳运动控制方程。下面给出求解方程(8)和(9)的初始条件。

由实验观察知,在塞柱开始滑移之前,球壳已形成一个半径为 r_b 的窝陷。在这一时刻,壳体在 $r = r$ 处的速度与弹体的速度是一致的,即 $\omega_{10} = \omega_{20}$ 。但是,弹体与壳体之间的作用是通过相互接触而完成的,因此从理论上直接确定 r_b 之值是非常困难的,故需引入经验假定。在这里,我们假定

$$r_b = 2r. \quad (20)$$

这样,方程(18)和(19)的初始条件为当 $t = 0$ 时,

$$\omega_{10} = \omega_{20} = \frac{r_b^2 - r^2}{2R}, \quad (21)$$

$$\dot{\omega}_{10} = \dot{\omega}_{20} = \frac{MV_0}{(M + \pi \rho_0 r_b h)}. \quad (22)$$

方程(18)和(19)可由Runge-Kutta方程求解。

2 数值结果与讨论

现考虑文献[9, 10]研究过的例子:这是一个铝合金球形壳,该球壳的曲率半径 $R = 221.2$ mm,厚度 $h = 1.0$ mm,底圆半径 $r_0 = 160$ mm,壳体的屈服应力 $\sigma_0 = 190$ N/mm²,子弹的截面半径 $r = 6$ mm。在计算中,根据实验知,棱区的宽度 ε 与曲率半径 R 相比是一个小量且它的数量级与球壳的厚度一致,因此假定 $\varepsilon = 2$ mm。在图3~图6中,分别给出了贯穿时间_弹体初速度曲线;残余中心挠度_弹体初速度曲线;窝陷半径_弹体初速度曲线和弹体贯穿后速度_弹体初

速度曲线。从这些图可看出, 贯穿时间与窝陷半径是随着弹体初速度的增加而减小, 而贯穿后弹体速度是随着弹体初速度的增加而增加。这些现象均是符合物理实际情形的。

此外, 从计算过程中发现, 当 $v_0 \leq 67.5 \text{ m/s}$ 时, 方程(18) 和(19) 无解。因此, 可将 $v_0^1 = 67.5 \text{ m/s}$ 取为贯穿球壳的最小极限速度。另外, 由实验结果^[9] 可知, 贯穿该球壳的最小速度为 $v_0^0 = 84 \text{ m/s}$, 二者之间的误差为 19%, 这表明本文结果是满足工程设计要求的。

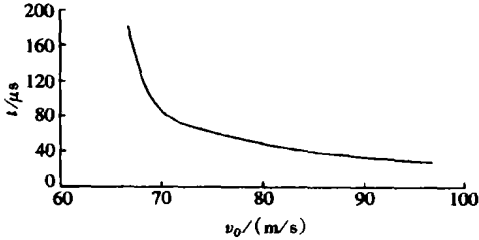


图3 贯穿时间 t 与弹体初速度 v_0 关系曲线

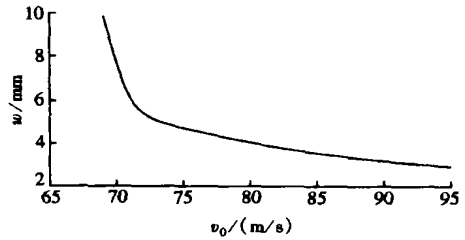


图4 中心挠度 w 与弹体初速度 v_0 关系曲线

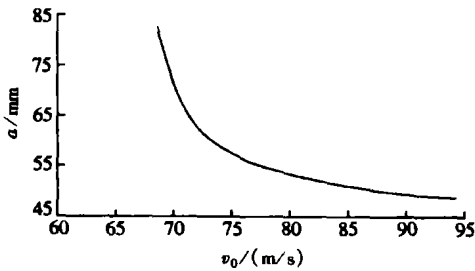


图5 凹陷半径 a 与弹体初速度 v_0 关系曲线

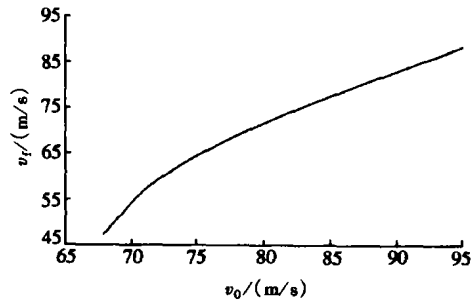


图6 弹体剩余速度 v_f 与弹体初速度 v_0 关系曲线

3 结 论

对于球形薄壳在平头圆柱体冲击下的贯穿过程, 本文进行了分析求解。首先, 基于实验和球壳大变形的特点, 给出了该球壳在撞击体的作用下的贯穿模型; 然后采用 Hamilton 原理, 导出了运动控制方程组, 并数值求解了该方程组。最后分别给出了贯穿时间_弹体初速度; 残余窝陷半径_弹体初速度; 贯穿后弹体剩余速度_弹体初速度的关系曲线。

致谢 本文得到国家自然科学基金(90305018)资助, 特此表示感谢。

[参 考 文 献]

- [1] 钱伟长. 穿甲力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1984.
- [2] Liss J, Goldsmith W, Kelly J M. A phenomenological penetration modal of thin plates[J]. Internat J Impact Engng, 1983, 1(3): 321—341.
- [3] Fonnestal M J, Ink V K, Rosenbery Z, et al. Penetration of 7075~ 7651. aluminum targets with ogival_nose rods[J]. Internat J Solids Struct, 1992, 29: 1729—1736.
- [4] Corbett G G, Reid S R, Johnson W. Impact loading of plates and shells by free_flying projectiles a review[J]. Internat J Impact Engng, 1996, 18(2): 141—230.
- [5] Taber L A. Compression of fluid_filled spherical shells by rigid indenters[J]. Trans ASME J Appl

- Mech, 1983, **50**: 717—722.
- [6] Wen H.M. Large plastic deformation of spherical shells under impact by blunt ended missiles[J]. Internat J Pres Ves & Piping, 1997, **67**: 147—152.
- [7] Pogorelov A V. Geometrical Method in Nonlinear of Elastic Shells [M]. Moscow: Izd, Nauka, 1967.
- [8] Zhong H Z, Ruiz C. Assessment of damage resulting from missile impact on a spherical shell[J]. Internat J Impact Engng, 1990, **9**: 223—236.
- [9] 杨桂通. 冲击载荷下结构动态行为的实验研究[J]. 力学学报, 1990, **22**(4): 374—379.
- [10] 宁建国. 弹塑性球形薄壳在冲击载荷作用下的动力分析[J]. 固体力学学报, 1998, **19**(4): 313—320.
- [11] NING Jian_guo, SONG Wei_dong, LIU Hai_yan. Failure analysis of plastic thin spherical shells under local impact[J]. Key Engineering Materials, 2003, **233/236**: 229—234.

Perforation of Plastic Spherical Shells Under Impact by Cylindrical Projectiles

NING Jian_guo, SONG Wei_dong

(State Key Laboratory of Explosion Science and Technology,
Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, P. R. China)

Abstract: The objective is to study the perforation of a plastic spherical shell impacted by a cylindrical projectile. First, the deformation modes of the shell were given by introducing an isometric transformation. Then, the perforation mechanism of the shell was analyzed and an analytical model was advanced. Based on Hamilton principle, the governing equation was obtained and solved using Runge_Kuta method. Finally, some important theoretical predictions were given to describe the perforation mechanism of the shell. The results will play an important role in understanding the perforation mechanism of spherical shells impacted by a projectile.

Key words: thin shell; impact; perforation