

# 爆炸冲击波对圆抛物面薄壳雷达天线 毁伤效应研究\*

赵文杰, 蒋浩征, 王秀兰

(北京理工大学, 北京 100081)

[摘要] 通过实验和理论分析, 对圆抛物面薄壳型雷达天线在爆炸冲击波载荷作用下的变形特点及有关的变形特征参量进行分析讨论, 给出了工程计算式, 从而可进行毁伤效应评估。

[关键词] 爆炸冲击波; 薄壳; 雷达天线; 毁伤效应

[中图分类号] TJ011.1+1 [文献标识码] A

## 1 引言

反辐射导弹是利用雷达天线辐射的电磁波对其进行搜索、跟踪而最终导向目标, 因此雷达天线是反辐射导弹直接攻击的目标。在爆炸冲击波载荷作用下天线反射面变形将造成其功能减弱直至失效, 而被毁伤。在雷达反射面天线结构中, 圆抛物面薄壳是一种典型结构, 本文通过实验研究与理论分析相结合的方法, 对圆抛物面薄壳在爆炸冲击载荷作用下的变形毁伤效应进行分析研究。

## 2 实验研究

### 2.1 实验条件

靶板为圆抛物面薄壳体, 口面朝上, 中心固定支撑; TNT 裸装药柱在靶板上方, 其中心轴垂直地面上且通过靶板中心, 通过药柱爆炸产生的冲击波对靶板施加载荷。壳体材料为 LF21, 口径圆直径  $D = 1200\text{mm}$ , 焦距  $f = 428\text{mm}$ , 板厚  $h = 1.2\text{mm}$ ; 中心固定支撑体直径  $d_1 = 400\text{mm}$ , 如图 1 所示。

### 2.2 靶板变形分析

靶板在不同的爆炸冲击波载荷作用下的变形呈现出相同的特点, 如图 2 所示。靶板在爆炸冲击波载荷作用下从中心支撑圆(直径为  $d_1$ )向外的部分弯曲下陷, 并在某一部位形成塑性“棱区”。由于药柱正对靶板中心, 在圆周方向载荷相对于靶板的作用是均匀的, 因而沿圆周方向靶板各点的变形也是均匀的, 在圆周方向形成一个塑性棱圆, 其直径用  $d_2$  来表示。随着

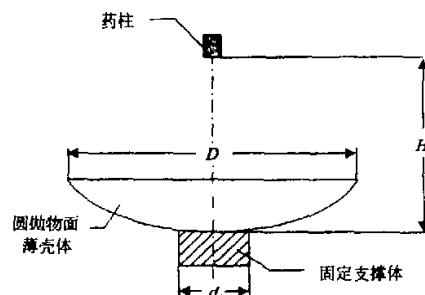


图 1 靶板及加载示意图

\* 收稿日期: 1999-12-15

作者简介: 赵文杰, 讲师, 博士。主要研究方向: 导弹战斗部终点效应与优化设计、引战配合效率与仿真。

载荷的增大,此塑性棱圆的直径逐渐增大,同时变形量也逐渐增大。通过测量靶板表面残余变形的轴向(z方向)位移,采用曲线拟合技术进行分析,得到描述壳体表面轴向位移的函数关系式:

$$W_z(y) = \begin{cases} W_{zm} - C_0(y - y_m)^2 & y_1 \leq y \leq y_m \\ W_{zm} & y_m < y \leq \frac{D}{2} \end{cases} \quad (1)$$

式中  $W_{zm}, y_m$  ——壳体表面最大轴向位移及其对应的位置坐标;

$D$  ——抛物面口徑圆直径;

$y_1$  ——中心支撑圆外沿的  $y$  方向坐标,  $y_1 = d_1/2$ ;

$C_0$  ——实验常数。

其中  $y_m$  的位置在塑性棱圆位置附近,因此可取  $y_m \approx d_2/2$ 。

### 3 理论分析

从爆炸冲击波对圆抛物面薄壳天线的毁伤效应方面而言,所关心的主要是在冲击波载作用下薄壳表面所出现的最大变形和变形范围,对运动变形的详细历程不作过多的关注。因此本文在进行理论分析时,采用能量分析的方法,对中心固定支撑,内表面受爆炸冲击波载荷作用的圆抛物面薄壳体的最大轴向位移及其位置作一近似的工程计算。

#### 3.1 薄壳变形能

圆抛物面薄壳体的中曲面为旋转曲面,旋转曲面的曲率线是它的子午线(经线)和平行圆(纬线),以  $\theta$  和  $\varphi$  分别作为曲线坐标参数,坐标曲线的切向单位矢  $e_1, e_2$  和曲面的法向单位矢  $m$  组成正交右手系,如图 3 所示。中曲面上任一点在  $e_1, e_2$  和  $m$  方向上的投影分别为  $u, v$  和  $w$ 。 $u, v$  和  $w$  都是坐标  $\theta$  和  $\varphi$  的函数,旋转曲面的拉梅系数为

$$A_1 = R_1 \quad A_2 = R_2 \sin \theta \quad (2)$$

式中  $R_1$  和  $R_2$  分别是沿子午线和平行圆的曲率半径,  $A_1, A_2, R_1, R_2$  都只是  $\theta$  的函数。

在薄壳体内距中面为  $n$  处,取出边长为  $ds_1^n, ds_2^n$  和  $dn$  的微分单元体,其中  $ds_1^n, ds_2^n$  是等距曲面内沿曲率线的微分弧长,如图 4 所示。

该微分单元体的体积是

$$dV = ds_1^n \cdot ds_2^n \cdot dn = A_1 A_2 (1 + \frac{n}{R_1})(1 + \frac{n}{R_2}) d\theta \, d\varphi \, dn \quad (3)$$

对于薄壳体,取  $1 + \frac{n}{R_1} \approx 1, 1 + \frac{n}{R_2} \approx 1$ 。

根据薄壳理论的两个基本假设<sup>[1]</sup>,同时假定壳体内表面受均布法向压力,载荷相对于壳体的旋转轴  $Z$  对称,即载荷只是  $\theta$  的函数,则

$$\gamma_{\theta\theta} = 0, \gamma_{\varphi\theta} = 0, \sigma_n = 0, \tau_{\theta\varphi} = 0, \tau_{\varphi n} = 0$$

因此微分单元体的变形能为

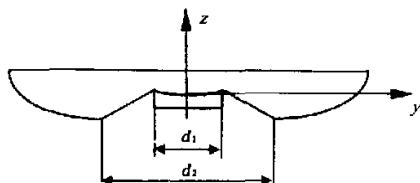


图 2 靶板变形示意图

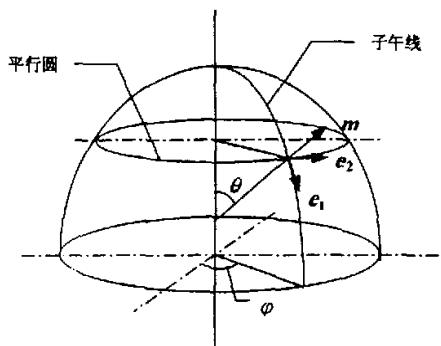


图 3 旋转曲面

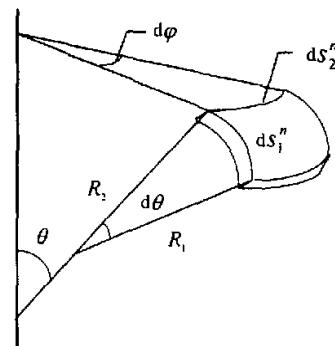


图 4 微分单元体

$$dU = (\sigma_\theta \epsilon_\theta^n + \sigma_\varphi \epsilon_\varphi^n) A_1 A_2 d\theta d\varphi dn \quad (4)$$

$$\text{其中 } \epsilon_\theta^n = \epsilon_\theta + k_1 n \quad \epsilon_\varphi^n = \epsilon_\varphi + k_2 n$$

式中  $\epsilon_\theta, \epsilon_\varphi$  —— 中曲面上沿  $\theta$  和  $\varphi$  方向的应变;

$k_1, k_2$  —— 中曲面上沿  $\theta$  和  $\varphi$  的曲率的改变。

对于旋转曲面, 在轴对称情况下位移  $u, w$  只是  $\theta$  的函数, 且  $v=0$ , 根据几何方程和高斯—柯达齐方程可得<sup>[1]</sup>:

$$\epsilon_\theta = \frac{1}{R_1} \cdot \frac{du}{d\theta} + \frac{w}{R_1} \quad \epsilon_\varphi = \frac{\operatorname{ctg}\theta}{R_2} u + \frac{w}{R_2} \quad (5)$$

$$k_1 = \frac{1}{R_1^2} \cdot \frac{du}{d\theta} - \frac{1}{R_1^2} \cdot \frac{d^2 w}{d\theta^2} \quad k_2 = \frac{\operatorname{ctg}\theta}{R_1 R_2} u - \frac{\operatorname{ctg}\theta}{R_1 R_2} \cdot \frac{dw}{d\theta} \quad (6)$$

而剪应变和扭率皆为零。在发生塑性变形时, 应力  $\sigma_\theta$  和  $\sigma_\varphi$  应满足屈服条件:

$$f(\sigma_\theta, \sigma_\varphi) = 0$$

设材料为理想刚塑性, 对于旋转薄壳, 根据屈雷斯卡(Tresca)屈服条件, 在塑性应变率  $\dot{\epsilon}_\theta > 0$  及  $\dot{\epsilon}_\varphi > 0$  的状态下, 有  $\sigma_\theta = \sigma_\varphi = \sigma_s$  ( $\sigma_s$  为材料屈服强度)<sup>[2]</sup>, 考虑动载荷是垂直于中面的法向载荷, 于是中面位移  $u$  相对于法向位移  $w$  可以略去, 同时在弯曲变形能中只考虑环向 ( $\varphi$  方向) 曲率改变的影响。在薄壳的整个体积上进行积分得塑性变形能为

$$\begin{aligned} U &= 4\pi\sigma_s \int_0^{h/2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \left[ \left( \frac{w}{R_1} + \frac{w}{R_2} \right) + \left( -\frac{\operatorname{ctg}\theta}{R_1 R_2} \cdot \frac{dw}{d\theta} \right) n \right] R_1 R_2 \sin\theta d\theta dn \\ &= 2\pi\sigma_s h \int_{\theta_1}^{\theta_2} \left[ (R_2 \sin\theta + R_1 \sin\theta) w d\theta - \frac{\pi\sigma_s h^2}{2} \int_{\theta_1}^{\theta_2} (\cos\theta \frac{dw}{d\theta}) d\theta \right] \end{aligned} \quad (7)$$

式中  $h$  为薄壳的厚度。根据抛物线的性质可知:

$$R_2 = \frac{2f}{\cos\theta} = \sqrt{y^2 + 4f^2}; \quad R_1 = \frac{2f}{\cos^2\theta} \quad (8)$$

从塑性棱圆向外的部分(即  $y_m \sim D/2$  的区域), 壳体表面未发生塑性变形, 因而可只考虑中心支撑圆至塑性棱圆( $y_1 \sim y_m$ )之间区域的塑性变形能。由支撑边界条件可知, 当  $y=y_1$  时,  $W_z(y_1)=0$ 。因而, 根据(1)式得:

$$W_{z_m} = C_0 (y_1 - y_m)^2 \quad (9)$$

壳体表面法向位移为：

$$\begin{aligned} w &= W_z \cos \theta = [W_{zm} - C_0(y - y_m)^2] \cos \theta \\ &= C_0[(y_1 - y_m)^2 - (y - y_m)^2] \cos \theta \end{aligned} \quad (10)$$

将塑性变形能式(7)中的积分变量和积分限进行代换并积分,得

$$\begin{aligned} U &= 8\pi\sigma_h C_0 f^2 \sqrt{4f^2 + y^2} \left( \frac{-8f^2 - y_1^2 + 2y_1 y_m - 2y_m y - y^2}{4f^2 + y^2} \right) \Big|_{y_1}^{y_m} \\ &+ 2\pi\sigma_h C_0 \sqrt{4f^2 + y^2} \left( \frac{8f^2 + 3y_1^2 - 6y_1 y_m + 3y_m y - y^2}{3} \right) \Big|_{y_1}^{y_m} \\ &- \frac{\pi\sigma_h^2 C_0 f^2 (4f^2 + y_1^2 - 2y_1 y_m + 2y_m y)}{4f^2 + y^2} \Big|_{y_1}^{y_m} - \pi\sigma_h^2 C_0 f y_m \cdot \arctg \left( \frac{y}{2f} \right) \Big|_{y_1}^{y_m} \\ &+ \pi\sigma_h^2 C_0 f^2 \ln(4f^2 + y^2) \Big|_{y_1}^{y_m} + 8\pi\sigma_h C_0 f^2 y_m \cdot \ln(y + \sqrt{4f^2 + y^2}) \Big|_{y_1}^{y_m} \end{aligned} \quad (11)$$

### 3.2 薄壳最大轴向位移及其相应位置的工程计算

爆炸冲击波脉冲载荷作用在壳体表面,使壳体获得了一个初始动能  $E_{v0}$ ,壳体开始运动并发生塑性变形。假设壳体获得的爆炸冲击波能量全部转化为其塑性变形能,则

$$E_{v0} = U \quad (12)$$

式中  $U$ ——壳体的变形能;

壳体获得的初始动能表示为

$$E_{v0} = \frac{I_0^2}{2m_s} = \frac{(i_+ \cdot S_d)^2}{2m_s} \quad (13)$$

式中  $I_0$ ——爆炸冲击波冲量;

$i_+$ ——爆炸冲击波正压作用比冲量;

$S_d$ ——承受冲击波载荷作用的壳体表面积;

$m_s$ ——承受冲击波载荷作用的壳体质量。

不考虑壳体中心固定支撑部分,对于抛物面薄壳有:

$$S_d = \frac{8f^2\pi}{3} \left[ (1 + \frac{(D/2)^2}{4f^2})^{3/2} - (1 + \frac{(d_1/2)^2}{4f^2})^{3/2} \right] \quad (14)$$

则  $m_s = \rho S_d h$

式中  $f$ ——抛物面焦距;

$d_1$ ——中心支撑圆直径;

$\rho$ ——壳体材料密度;

$h$ ——壳体厚度。

爆炸冲击波作用于目标时,将发生反射和绕流现象。对于不同的目标形状,其作用过程非常复杂。反射冲击波的研究,主要是针对冲击波在刚性壁面上的反射进行的。绕流对目标破坏的影响,可通过实验对反射冲击波进行修正。在刚性壁面上正规反射冲击波峰值超压和正压作用比冲量可参见文献[3][4]。

将(11)式的塑性变形能  $U$  代入(12)式中,并按幂级数展开,略去高阶量,得到关于  $y_m$  的一个 5 次方程:

$$a_1 y_m^5 + a_2 y_m^4 + a_3 y_m^3 + a_4 y_m^2 + a_5 y_m + a_6 = 0 \quad (15)$$

其中

$$\begin{aligned}
 a_1 &= \frac{C_0 y_1}{2f} & a_2 &= \frac{8C_0 f}{3} - C_0 f - \frac{5C_0 h}{48} + \frac{C_0 y_1^2}{4f} \\
 a_3 &= -4C_0 f y_1 + C_0 y_1 b + \frac{1}{2} C_0 f h \cdot \operatorname{arctg} \left( \frac{y_1}{2f} \right) + 4C_0 f^2 \cdot \ln(2f) - 4C_0 f^2 \cdot \ln(y_1 + b) \\
 a_4 &= -\frac{32C_0 f^3}{3} - C_0 f^2 h + 2C_0 f y_1^2 + \frac{16C_0 f^4 + 4C_0 f^2 y_1^2}{b} + \frac{4C_0 f^2 - 2C_0 y_1^2}{3} \cdot b - \frac{E_{ea}}{2\pi\sigma_s h} \\
 &\quad + \frac{C_0 f^2 h \cdot \ln(4f^2) - C_0 f^2 h \cdot \ln(b^2)}{2} \\
 a_5 &= C_0 f^2 h y_1 + 4C_0 f^2 y_1 b + 2C_0 f^3 h \cdot \operatorname{arctg} \left( \frac{y_1}{2f} \right) + 16C_0 f^4 \ln(2f) - 16C_0 f^4 \ln(y_1 + b) \\
 a_6 &= -\frac{128C_0 f^5}{3} - \frac{C_0 f^2 h y_1^2}{2} + \frac{64C_0 f^6 + 16C_0 f^4 y_1^2}{b} + \frac{16C_0 f^4 b}{3} - \frac{8C_0 f^2 y_1^2 b}{3} - \frac{E_{ea} \cdot f^2}{2\pi\sigma_s h} \\
 &\quad + 2C_0 f^4 h \cdot \ln(4f^2) - 2C_0 f^4 h \cdot \ln(b^2) \\
 b &= \sqrt{4f^2 + y_1^2}
 \end{aligned}$$

求解该方程并由(9)式,即可得到在不同的爆炸冲击波载荷作用下抛物面薄壳体表面最大轴向位移  $W_{zm}$  及其相应位置  $y_m$  的近似估值。

以实验中所用靶板及爆炸加载条件为例进行估算,所得计算结果与实验结果对照如表 1 所示。

表 1 计算值与实验值比较

项目 靶板	$y_m$ (cm)			$W_{zm}$ (cm)		
	计算值	实验值	相对误差	计算值	实验值	相对误差
1#板	34.3	35	0.02	7.57	7.36	0.023
2#板	38	40	0.05	12	11.01	0.084
3#板	35.5	36	0.014	8.89	8.18	0.086

注:1#板:150g TNT,  $H=1.5$ m; 2#板:150g TNT,  $H=1.2$ m; 3#板:100g TNT,  $H=1.2$ m。

## 4 结 论

由表 1 结果可见,理论计算估值与实验结果较为符合,基本反映了在不同爆炸冲击波载荷作用下,圆抛物面薄壳表面最大轴向位移及其位置的变化规律,从而可以判定天线功能减弱的程度,由此可以对爆炸冲击波载荷作用下,圆抛物面薄壳类型天线的毁伤效应进行分析评估。

## 参 考 文 献

- 1 刘鸿文主编.板壳理论[M].浙江大学出版社,1987.
- 2 徐秉业,刘信声.结构塑性极限分析[M].北京:中国建筑工业出版社,1985.
- 3 北京工业学院八系《爆炸及其作用》编写组.爆炸及其作用[M].北京:国防工业出版社,1979.
- 4 James F. Proctor. Internal Blast Damage Mechanisms Computer Program[R]. AD759002,1972.
- 5 叶尚辉,李在贵.天线结构设计[M].西安:西北电讯工程学院出版社,1986.

## The Study of Destructive Effects of The Radar Antenna With Parabolic Shell Surface By Blast Wave

Zhao Wenjie, Jiang Haozheng, Wang Xiulan

(Beijing Institute of Technology, Beijing 100081)

**[Abstract]** Through measuring the deformation of the parabolic shell surface which is supported at center fixation and exposed under different impulsive loading respectively the deformation feature of the shells are analyzed, the correlative curves and equations are obtained. By means of Similarity Principle, the analogy of the dynamic response of the plasticity of the parabolic shell has been studied. The result can be used in anti-radar warhead design and destructive effect analysis of the radar antenna.

**[Key words]** Impulsive loading; Thin shell; Blast wave; Similarity principle; Antenna

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com)),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养, 更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果, 又能免除您舟车劳顿的辛苦, 学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲, 结合实际工程案例, 直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>