

文章编号: 1001-1455(2008)06-0557-04

# 用柔爆索构成沿圆柱壳体周向 呈余弦分布的冲量载荷\*

赵国民<sup>1</sup>, 王占江<sup>2</sup>, 张若棋<sup>1</sup>

(1. 国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073;

2. 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

**摘要:** 利用柔爆索爆炸加载模拟脉冲 X 射线辐照产生的汽化反冲冲量进行结构响应实验研究, 需要对柔爆索载荷的分布特征进行直接的实验测定。按照优化设计结果在圆柱壳体周围排布一定数量的柔爆索, 测量柔爆索爆炸在圆柱壳体表面不同角度处产生的冲量。测量结果表明通过优化设计柔爆索间距及柔爆索与圆柱壳体之间的距离可得到沿圆柱壳体周向呈余弦分布的冲量载荷。

**关键词:** 爆炸力学; 冲量载荷; 优化设计; 柔爆索

**中图分类号:** O383

**国标学科代码:** 130·35

**文献标志码:** A

## 1 引 言

当强脉冲 X 射线辐照到圆柱壳体上时, 在圆柱壳体迎光面薄层内沉积大量能量, 使这一薄层材料汽化。高温高压的汽化物质迅速向外飞散, 形成作用在圆柱壳体上沿周向近似呈余弦分布的汽化反冲冲量, 造成圆柱壳体振动, 甚至导致永久大变形和屈曲破坏。为了在实验室条件下研究这种由 X 射线辐照引起的结构响应, 国外发展了化学爆炸加载、电子束辐照和爆炸金属箔等模拟方法, 其中以化学爆炸模拟应用最普遍。20 世纪 60 年代的化学爆炸模拟方法是将薄膜炸药或炸药条贴在圆柱壳体的表面上爆炸<sup>[1]</sup>。到 20 世纪 70 年代, 美国圣地亚实验室完善了用强光引爆喷涂在结构表面上的光敏炸药的方法<sup>[2]</sup>。20 世纪 80 年代以后, 美国斯坦弗研究所发展了 SPLAT(spray lead at target)技术<sup>[3]</sup>, 它是在圆柱壳体的加载面附近排布一定数量的铅壳柔爆索(MDF: mild detonating fuse), 利用 MDF 爆炸产生大量雾状铅粒子直接打击圆柱壳体表面形成冲量载荷。通过改变 MDF 间距及 MDF 与圆柱壳体之间的径向距离可得到沿圆柱壳体周向呈余弦分布的冲量载荷。

从 20 世纪 90 年代中期开始, 赵国民等<sup>[4]</sup>对用 MDF 冲量模拟脉冲 X 射线辐照圆柱壳体产生的结构响应进行了研究。对一种外直径 2.0 mm 的铅壳 MDF 的爆炸特性进行了系统的实验研究, 测量了这种 MDF 的爆速、爆炸后产生的铅粒子的飞散速度以及铅粒子的粒度, 测得 MDF 爆炸产生的铅粒子的平均直径仅 2.7  $\mu\text{m}$ , 因此, 大量这样细小的铅粒子打击圆柱壳体表面所形成的冲量载荷可以认为是连续的。提出了通过优化设计圆柱壳体周围 MDF 的排布参数, 以得到沿周向近似呈余弦分布的冲量载荷, 并利用小尺寸圆柱壳体开展了结构响应实验研究, 测量了圆柱壳体内表面的周向应变及残余变形<sup>[5]</sup>。虽然计算结果表明, 通过优化设计得到的 MDF 载荷近似呈余弦分布, 且测得的圆柱壳体残余变形与文献<sup>[6]</sup>中的余弦分布冲量作用下的残余变形特征一致, 但是对 MDF 载荷的分布特征未进行直接的实验测定。

在本文中, 我们设计了一套冲量测量装置, 直接测量圆柱壳体表面不同角度处的冲量, 验证了按优化设计结果排布的 MDF 爆炸产生的冲量确实近似呈余弦分布。

\* 收稿日期: 2007-04-12; 修回日期: 2008-01-23

作者简介: 赵国民(1963—), 男, 博士, 教授。

## 2 冲量测量实验装置

为直接测量 MDF 爆炸在圆柱壳体表面上不同角度处产生的冲量,验证其余弦分布规律,设计加工了一外直径 250 mm、厚 5 mm 的钢制半圆柱壳。如图 1 所示,在半圆柱壳体上开 3 个  $\varnothing 26$  mm 的孔,将  $\varnothing 25$  mm 的冲量测量探头放在各孔中,用以测量  $0^\circ$ 、 $20^\circ$  和  $40^\circ$  处的冲量。实验时将探头表面与半圆柱壳外表面探头孔中心线持平。

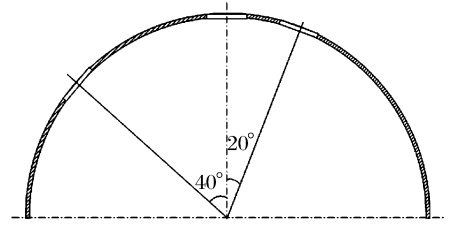


图 1 冲量测点示意图

冲量测量采用滑杆法,用光电方法进行非接触测量。靠线轴承的支承可在圆柱形套筒内自由滑动的滑杆一端安装靶板,滑杆的另一端加工有一系列的环形槽。圆柱形套筒的两侧分别装有发光管和光电管。滑杆系统受冲量载荷作用后运动,环形槽依次通过发光管、光电管,形成一系列的通断光现象,从而使光电管输出一系列脉冲信号。判读脉冲信号的时间间隔,再由已知的环形槽宽度和滑杆系统的质量,计算出系统的速度和受到的冲量。

采用最优化方法,利用文献[7]中标定的一种外径 1.5 mm、装药量为 0.83 g/m 的 MDF 的参数,优化设计了  $\theta=0^\circ$  处比冲量约  $200 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  的近似余弦分布的 MDF 冲量,设计结果如图 2 所示,其中图 2(a) 为 MDF 排布位置,图 2(b) 为比冲量随角度的变化。

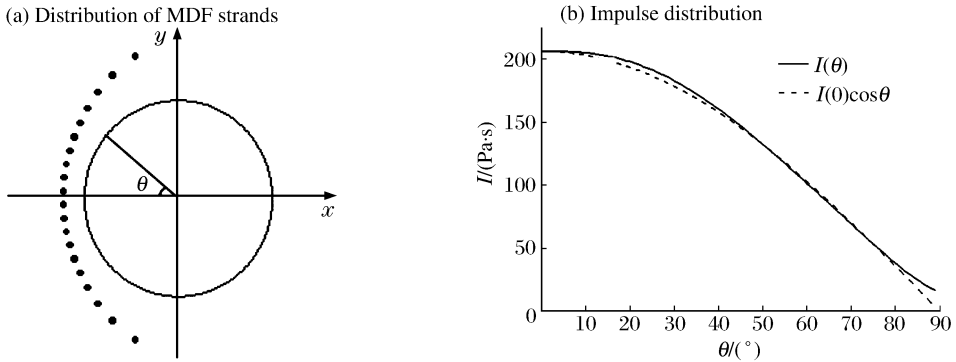


图 2 余弦分布的 MDF 冲量优化设计结果

Fig. 2 Optimized results for cosine distribution of MDF impulse

实验中实际使用的 MDF 外径为 1.5 mm, MDF 中炸药质量为 1.16 g/m、铅壳质量为 10.88 g/m。用 Gurney 公式估算 MDF 爆炸后铅粒子飞散速度为 932 m/s。如仍按上述排布方案安装 MDF,则计算出峰值比冲量约  $220 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。实验时将 MDF 穿入按优化设计结果加工的 MDF 定位板上的小孔中并用 502 胶固定,以实现按设计的间距及与圆柱壳体距离排布。在起爆端通过一塑料套管与雷管相连。安装完成后的实验装置如图 3 所示。

## 3 柔爆索冲量的实验标定

实验中测得的典型示波器记录信号如图 4 所示。从图中判读出各周期的时间间隔,利用事先测量的通、断光环形槽宽度,即可计算出速度。判读图 4 中各通、断光周期的时间间隔,再由已知的环形槽宽度,计算出各通、断光周期内的平均速度,如图 5 所示。由图可见,各测点处的滑杆系统速度在前 5 个周期内都基本没有衰减,在处理数据时用前 5 个周期内的平均速度计算靶板受到的冲量。

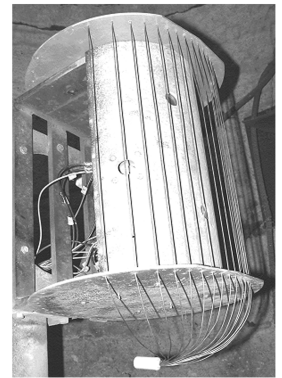


图 3 冲量测量装置照片

Fig. 3 Photograph of the device

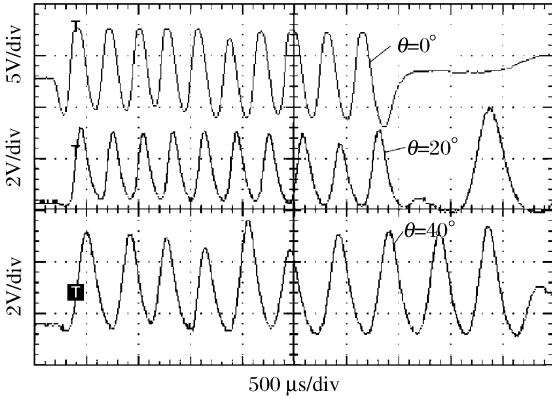


图 4 典型示波器记录信号

Fig. 4 Typical record waves of oscilloscope

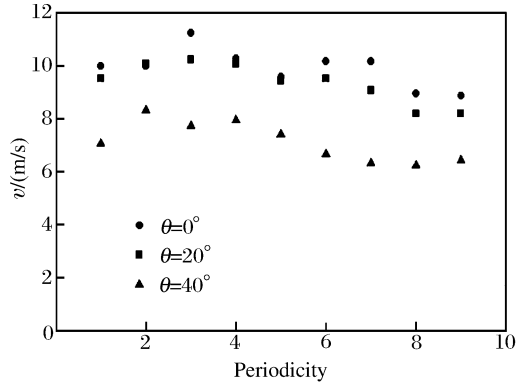


图 5 滑杆系统的速度变化

Fig. 5 Velocity varieties of the slip bar system

对如图 2 所示的 MDF 排布方式共进行了 3 次实验,实验中每个测点处虽只有 1 套滑杆系统,但在滑杆两侧安装有两套发光管和光电管,每个测点处每次可测得 2 个信号。判读各信号中前 5 个周期的时间间隔,计算出各测点处滑杆系统速度,再由已知的滑杆及靶板质量算出滑杆系统的总动量,即为靶板受到的总冲量,除以靶板面积可得各测点处的平均比冲量。

计算结果如表 1 所示。由表中结果可见,不论是每次的实测结果还是 3 次的平均值,都表现出 0°处最大,40°处最小,近似呈余弦分布,但各次之间差异较大。由于实验中用的 MDF 是单根拉成的,一般 1 根的长度为十几米,做 1 次实验所用的十几米 MDF 基本上是从同一根 MDF 上截取的,各次之间的差异主要应是由不同根 MDF 之间的差异造成的。

采用最小二乘原理进行数据拟合,可得比冲量随角度变化的规律为

$$I = 297.2 \cos\theta$$

拟合得到的峰值比冲量约 280 Pa·s,明显大于实验前计算得到的值。这表明多根 MDF 爆炸后的相互作用使得冲量增加,也可采用我们在文献[4]中引入铅壳等效质量的方法处理。

将表 1 中的结果及拟合公式画到同一图中(图 6),可见实测结果分布在拟合曲线两侧,平均值基本位于拟合曲线上。表明按优化设计排布 MDF 确实可得到沿周向近似呈余弦分布的冲量载荷,但受 MDF 加工工艺的限制,拉制的不同根 MDF 的侧向加载能力仍有较大差异,各次实验测得的比冲量有一定的偏差,相关文献中也表明有同样的问题。文献[7]中使用的 2 根 MDF 产生的冲量相差约 5%。文献[3]中给出的 MDF 峰值比冲量为 210(±21)Pa·s,表明 MDF 冲量可能有 ±10% 的偏差。

表 1 各测点处的比冲量

Table 1 The measured impulses

实验发次	0°	20°	40°
2	273.2		208.4
2	275.3	261.1	207.9
3	248.0	241.4	219.2
3	251.4	240.7	219.0
7	308.2	293.3	236.1
7	310.2		
平均值	277.7	259.1	218.1

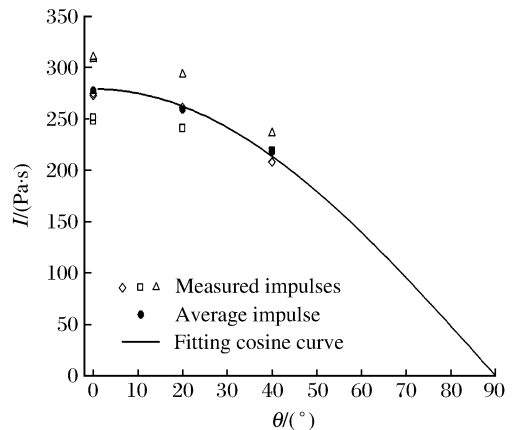


图 6 比冲量沿周向的变化

Fig. 6 Impulse distribution around the circumference

## 4 结 束 语

采用最优化方法设计圆柱壳体周围 MDF 的排布参数,据此设计加工了实验装置,用光电法测量了圆柱壳体表面不同角度处的冲量。实验结果表明,不论是各次测得的  $0^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $40^\circ$  处的冲量,还是这些测点处的平均冲量,都近似呈余弦分布。

### 参 考 文 献:

- [1] Lindberg H E, Sliter G E. Response of Reentry-Vehicle-Type Shell to Transient Surface Pressures[R]. AFWL-TR-68-56, 1969.
- [2] Benham R A, Mathews F H, Higgins P B. Application of Light-Initiated Explosive for Simulating X-ray Blowoff Impulsive effects on a Full Scale Reentry Vehicle[R]. SAND 76-9019, 1976.
- [3] Kirkpatrick S W, Holmes B S. Structural response of thin cylindrical shells subjected to impulsive external loads [J]. AIAA Journal, 1988,26(1):96.
- [4] 赵国民,张若棋,陈刚,等. 铅壳柔爆索爆炸特性实验研究[J]. 高压物理学报,2001,15(2):91.  
ZHAO Guo-min, ZHANG Ruo-qi, CHEN Gang, et al. Investigation of explosion characteristics of lead shield mild detonating fuse[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2001,15(2):91.
- [5] 赵国民,张若棋,彭常贤,等. 铅壳柔爆索爆炸冲量作用下圆柱壳体结构响应实验研究[J]. 爆炸与冲击,2002,19(2):126.  
ZHAO Guo-min, ZHANG Ruo-qi, PENG Chang-xian, et al. Experimental studies of structural response of cylindrical shells under mild detonating fuse impulse[J]. Explosion and Shock Waves, 2002,19(2):126.
- [6] Lindberg H E, Florence A L. Dynamic Pulse Buckling: Theory and Experiment[M]. Dordrecht: Martinus Nijhoff Publishers, 1987.
- [7] 赵国民,张若棋,彭常贤,等. 铅壳柔爆索爆炸产生冲量的实验[J]. 国防科技大学学报,2001,23(6):58.  
ZHAO Guo-min, ZHANG Ruo-qi, PENG Chang-xian, et al. Experiment of the impulse produced by the explosion of mild detonating fuses[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2001,23(6):58.

## To form a cosine distribution impulse around cylindrical shell circumference by using mild detonating fuse

ZHAO Guo-min<sup>1\*</sup>, WANG Zhan-jiang<sup>2</sup>, ZHANG Ruo-qi<sup>1</sup>

(1. College of Science, National University of Defense Technology,  
Changsha 410073, Hunan, China;

2. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, Shaanxi, China)

**Abstract:** Using mild detonating fuse(MDF) impulse simulating the X-ray blow-off impulse in studying the structural response of cylindrical shells, it is needed to measure the distribution characteristics of MDF impulse. According to the optimized results, an array of MDFs is arranged around a cylindrical shell, the MDF impulses at several angles around the circumference of the cylindrical shell are measured. The measured impulses indicate that a nearly cosine distributed impulse around the circumference can be obtained by designing the space between the MDF strands and the standoff distance from the strands to the shell.

**Key words:** mechanics of explosion; impulse; optimization design; mild detonating fuse

---

\* Corresponding author: ZHAO Guo-min  
E-mail address: gmzhao@nudt.edu.cn  
Telephone: 86-731-4573763-8410