

文章编号: 1001-2486 (2001) 06-0058-05

铅壳柔爆索爆炸产生冲量的实验*

赵国民, 张若棋

彭常贤, 谭红梅, 林鹏

(国防科技大学理学院, 湖南 长沙 410073) (西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要: 采用光电测量方法, 对铅壳柔爆索爆炸产生的冲量进行了实验测量。实验结果表明, 打击到靶板表面的铅粒子中仅有一小部分粘附在靶面上, 相邻柔爆索之间的相互作用使得冲量增大。

关键词: 柔爆索; 冲量; 光电测量

中图分类号: O38 **文献标识码:** A

Experiment of the Impulse Produced by the Explosion of Mild Detonating Fuses

ZHAO Guo-min, ZHANG Ruo-qi

(College of Science, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

PENG Chang-xian, TAN Hong-mei, LIN Peng

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xian, 710024, China)

Abstract: The impulse produced by the explosion of mild detonating fuses is measured by using photoelectric method. The experimental results indicated that only a small part of all lead particles hitting the target, adhere to it, and the impulse is produced by the interaction between exploded mild detonating fuses.

Key words: mild detonating fuses; impulse; photoelectric measurement

当强脉冲 X 射线辐照到导弹弹头壳体上时, 在弹头壳体迎光面薄层内沉积大量能量, 导致这一薄层材料熔化、汽化并迅速向外喷出, 形成作用在弹头壳体上的汽化反冲冲量^[1], 并可能引起弹头壳体振动、产生永久大变形等动力学结构响应。在实验室条件下常用化爆加载模拟脉冲 X 射线辐照引起的结构响应。Kirpatrick 等报导了利用铅壳柔爆索进行结构响应实验研究的技术^[2], 即在圆柱壳体的加载面附近排布一定数量的铅壳柔爆索, 利用柔爆索爆炸产生的大量雾状铅粒子直接打击圆柱壳体表面形成冲量载荷。柔爆索是 20 世纪 50 年代后期发展起来的一种新型索类火工品, 主要用于爆轰传递、延时控制以及在一个平面、球面或柱面上实现多点同时起爆等方面。用柔爆索加载进行结构响应实验研究时, 柔爆索爆炸产生的冲量是引起结构响应的载荷条件, 必须先深入研究。

1 柔爆索爆炸产生的冲量

对于如图 1(a) 所示的一簇与平面靶平行 (与纸面垂直) 的柔爆索, 当它们爆炸后引入以下假设^[3]: (1) 柔爆索爆炸产生的铅粒子以同一速度沿径向飞散, 在飞散过程中不受邻近柔爆索爆炸的影响。(2) 当铅粒子撞击靶面时, 与靶面垂直的速度分量变为零。在上述假设的基础上, 如果单位长柔爆索中铅壳的质量为 m , 则图 1(b) 所示的 $d\alpha$ 角范围内铅粒子的质量为 $m d\alpha / (2\pi)$, 与靶面垂直的动量为 $m d\alpha \cdot u \cos\alpha / (2\pi)$, 这里 u 为铅粒子的飞散速度。这些铅粒子打击到靶面上相应的 $dx = r d\alpha / \cos\alpha = h d\alpha / \cos^2\alpha$ 区间内, 由此得到一根柔爆索打到靶面上 x_0 点处单位面积上的铅粒子质量为

$$M_i = \frac{m}{2\pi h} \cos^2\alpha \quad (1)$$

* 收稿日期: 2001-06-15
 基金项目: 国家自然科学基金项目 (19472023)
 作者简介: 赵国民 (1963-), 男, 博士, 副教授。

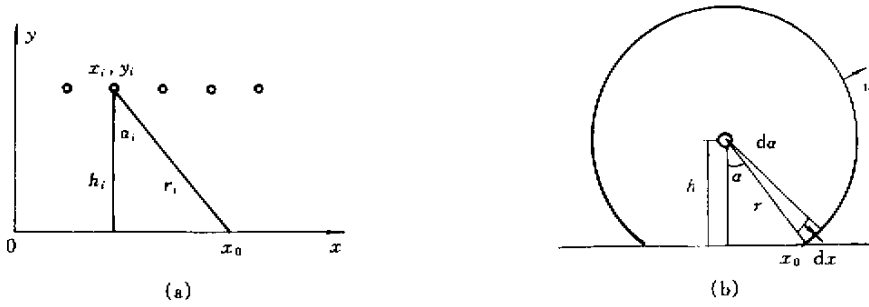


图1 柔爆索对靶作用示意图

Fig.1 Schematic diagrams of the mild detonating fuse act on targets

一根柔爆索在靶面上 x_0 点处产生的比冲量为

$$I_i = \frac{mu}{2\pi h} \cos^3 \alpha \quad (2)$$

图1(a)所示的多根柔爆索在靶面上 x_0 点处与靶面垂直的比冲量^[2]:

$$I = \sum_i \frac{mu}{2\pi h_i} \cos^3 \alpha_i \quad (3)$$

对面积为 A 的平板靶而言, 多根柔爆索打击到靶面上的总质量及作用到靶面上的总冲量分别为

$$M_c = \int_A \sum_i \frac{m}{2\pi h_i} \cos^2 \alpha_i dA \quad (4)$$

$$I_c = \int_A \sum_i \frac{mu}{2\pi h_i} \cos^3 \alpha_i dA \quad (5)$$

2 实验测量结果与分析

2.1 测量原理

冲量测量采用滑杆法, 用光电方法进行非接触测量。图2是测量装置示意图, 柔爆索安装在一长方形钢板上, 钢板中心开一个略大于冲量探头 ($\Phi 30\text{mm}$ 的平板靶) 的孔, 实验时将冲量探头的平板靶面与钢板对平, 钢板既被用来固定柔爆索, 又对冲量探头起到防护作用。平板靶后连接传信杆, 在传信杆的另一端加工有若干环形槽, 平板靶-传信杆系统可水平自由滑动。当平板靶受冲量载荷作用后运动时, 环形槽依次造成红外发光管与光电二极管之间一系列的通断光现象, 用示波器记录光电二极管输出的一系列脉冲信号, 判读脉冲信号的时间间隔, 再由已知的环形槽间距可计算出传信杆系统的速度。在实验前、后分别测量平板靶的质量, 可以得到粘附在靶面上的铅粒子质量。传信杆系统质量 (包括粘附铅粒子质量) 乘以运动速度可得到其动量。传信杆系统的动量即为平板靶受到的总冲量。这种方法的测量电路简单, 并且直接测量的是时间间隔而不是信号幅度, 不需要进行幅度标定。

2.2 测量结果及分析

实验中使用一种外径 1.5mm 铅壳柔爆索, 测得其单位长柔爆索中铅壳质量 $m = 0.13 \text{ g/cm}$, 单位长柔爆索的装药量 $c = 0.0083 \text{ g/cm}$, 用 Gurney 公式估算出铅粒子的飞散速度 $u = 0.73 \text{ km/s}$ 。采用 1~3 根柔爆索在不同间距及距靶面不同距离的条件下, 利用图2所示的装置, 测量柔爆索作用到直径为 30mm 圆靶上的总冲量及粘附在靶面上的铅粒子质量。典型的实验测量信号如图3所示, 测得的粘附到靶面上的铅粒子质量等结果见表1。由于传信杆系统在滑动时受摩擦力作用等因素的影响, 测量信号中的相邻脉冲间隔有小的变化, 表1中给出的脉冲间隔 Δt 为最小时间间隔。实验中所用传信杆后端的环形槽间距为 6mm , 由 Δt 即可计算出传信杆系统的速度, 进而算出靶板受到的冲量。

在距靶面不同距离时, 一根柔爆索爆炸后粘附到 $\phi 30 \text{ mm}$ 圆靶上的铅粒子质量 M_E , 以及作用到靶

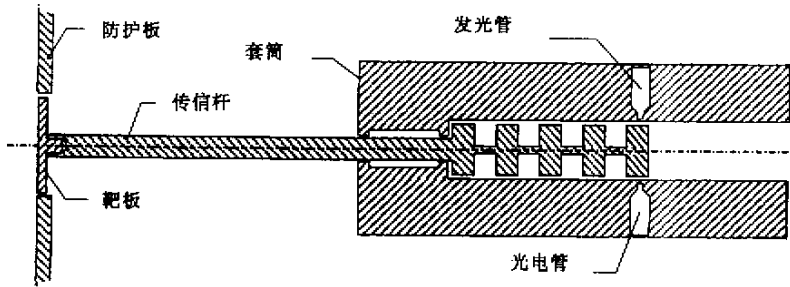


图2 冲量测量装置示意图

Fig.2 Schematic diagram of device to measurement impulse

上的总冲量的实测结果 I_E 列在表2中。实测结果有良好的重复性,在同样条件下测得的总冲量相对偏差小于3%。利用公式(4)(5)可计算出打击到靶面上的铅粒子质量及作用到靶上的总冲量,计算结果见表2中的 M_c 和 I_c 。由表可见, M_c 远大于 M_E ,表明打击到靶上的大部分铅粒子并没有粘附到靶面上。实测冲量 I_E 大于计算结果 I_c ,并且随着距离 h 的增加, I_E/I_c 也略有增大。

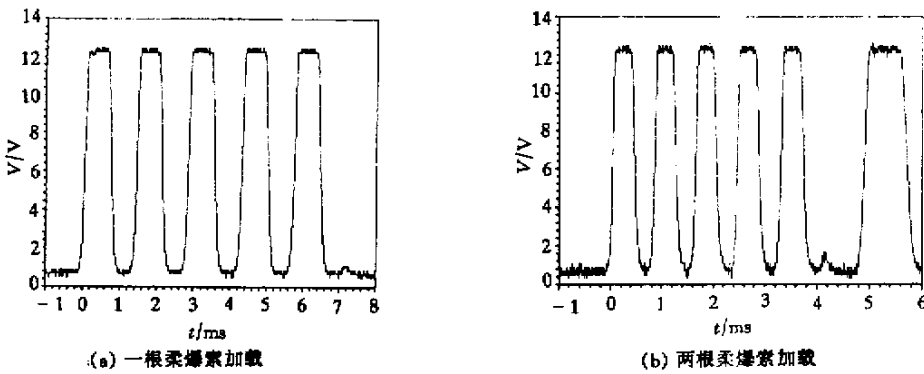


图3 典型的示波器记录信号

Fig.3 Typical record sign of oscilloscope

对两根柔爆索在不同间距及距靶面不同距离情况下产生的冲量也进行系统实验。在保持柔爆索间距不变的情况下,距靶面不同距离的柔爆索打击到 $\phi 30\text{mm}$ 圆靶上铅粒子质量及作用到靶上的总冲量见表3。表4给出了保持柔爆索距靶面距离不变的情况下,不同间距的柔爆索打击到 $\phi 30\text{mm}$ 圆靶上铅粒子质量及作用到靶上的总冲量。由表中的结果可知,用两根柔爆索加载时, M_E/M_c 的值仍然很小,表明粘附在靶面上的铅粒子仅占打击到靶上铅粒子的一小部分,而 I_E/I_c 的值明显大于一根柔爆索加载时 I_E/I_c 的值。在柔爆索间距为 10mm、柔爆索距靶板距离 15mm 的条件下,对三根柔爆索作用到直径 30mm 靶板上总冲量做了两次测量,两次实验测得的 I_E/I_c 的值分别为 1.41 和 1.42,明显大于一根柔爆索加载时 I_E/I_c 的值。这是由于柔爆索爆炸后的相互作用使得实测冲量增大。因此,多根柔爆索爆炸产生的总冲量将大于各根柔爆索冲量之和。实验结果还表明,在柔爆索间距 a 不变时, I_E/I_c 的值随 h 的增加略有增大,但 h 不变时, I_E/I_c 的值随间距 a 的变化不明显。

表 1 柔爆索爆炸产生冲量实测数据

Tab.1 Experimental results of impulse produced by exploding of mild detonating fuse

炮号 No.	柔爆索 根数 n	柔爆索距靶 面距离 h (mm)	柔爆索 间距 a (mm)	传信杆系 统质量 m (g)	靶面上粘附铅 粒子质量 Δm (g)	脉冲信号 间隔 Δt (ms)
0010	1	5	/	16.756	0.005	1.176
0016	1	5	/	16.833	0.004	1.208
0011	1	10	/	16.822	0.002	1.394
0013	1	10	/	16.779	0.002	1.402
0012	1	15	/	16.802	0.004	1.698
0015	1	15	/	16.803	0.003	1.662
0019	1	15	/	16.827	0.003	1.780
0004	2	10	14	16.819	0.010	0.680
0007	2	10	14	16.827	0.009	0.726
0005	2	15	10	16.736	0.014	0.770
0017	2	15	10	16.818	0.014	0.800
0001	2	15	14	16.822	0.008	0.792
0002	2	15	14	16.887	0.008	0.800
0018	2	15	14	16.814	0.011	0.826
0020	2	15	14	16.827	0.012	0.826
0006	2	15	18	16.831	0.006	0.874
0009	2	15	18	16.801	0.007	0.866
0003	2	20	14	16.808	0.007	0.888
0008	2	20	14	16.843	0.009	0.904
0014	3	15	10	16.828	0.016	0.519
0021	3	15	10	16.830	0.017	0.515

注：第 0019、0018、0020 炮使用的柔爆索与其它各炮所用的柔爆索是同时购买，但不同批次生产的。

表 2 一根柔爆索作用到 $\phi 30\text{mm}$ 靶上的冲量Tab.2 Impulse of one mild detonating fuse act on $\phi 30\text{mm}$ targets

柔爆索距靶面距离 h (mm)	5		10		15	
计算粘附质量 M_c (g)	0.140		0.104		0.080	
计算冲量 I_c (g·m/s)	80.5		66.2		54.0	
实测粘附质量 M_E (g)	0.005	0.004	0.002	0.002	0.004	0.003
实测冲量 I_E (g·m/s)	85.5	83.6	72.4	71.8	59.4	60.7
M_E/M_c (%)	3.6	2.9	2.0	2.0	5.0	3.8
I_E/I_c	1.06	1.04	1.09	1.08	1.10	1.12

表 3 两根柔爆索间距 $a = 14\text{mm}$ 不变时作用到 $\phi 30\text{mm}$ 靶上的冲量Tab.3 Impulse of two mild detonating fuses with space $a = 14\text{mm}$ act on $\phi 30\text{mm}$ targets

柔爆索距靶面距离 h (mm)	10		15		25	
计算粘附质量 M_c (g)	0.184		0.146		0.120	
计算冲量 I_c (g·m/s)	114.4		95.7		81.3	
实测粘附质量 M_E (g)	0.010	0.009	0.008	0.008	0.007	0.009
实测冲量 I_E (g·m/s)	148.5	139.1	127.5	126.7	113.6	111.9
M_E/M_c (%)	5.4	4.9	5.5	5.5	5.8	7.5
I_E/I_c	1.30	1.22	1.33	1.32	1.40	1.38

表4 两根柔爆索距靶面距离 $h = 15\text{mm}$ 不变时作用到 $\phi 30\text{mm}$ 靶上的冲量Tab.4 Impulse of two mild detonating fuses with standoff distance $h = 14\text{mm}$ act on $\phi 30\text{mm}$ targets

柔爆索间距 a (mm)	10		14		18	
计算粘附质量 M_c (g)	0.153		0.146		0.137	
计算冲量 I_c (g·m/s)	101.6		95.7		88.2	
实测粘附质量 M_E (g)	0.014	0.014	0.008	0.008	0.006	0.007
实测冲量 I_E (g·m/s)	130.5	126.2	127.5	126.7	115.6	116.5
M_E/M_c (%)	9.2	9.2	5.5	5.5	4.4	5.1
I_E/I_c	1.28	1.24	1.33	1.32	1.31	1.32

表5给出了采用同时购买的、不同批次生产的柔爆索加载测得的冲量。结果表明用同一批次生产的柔爆索在同样条件下的冲量有较好的重复性,不同批次生产的柔爆索爆炸产生的冲量有一定差异。实验中使用的第二批柔爆索产生的冲量比第一批柔爆索产生的冲量约小5%。

综合以上实验结果,在不同实验条件下,实测粘附到靶面上的铅粒子质量 M_c 总是远小于打击到靶面上的铅粒子总质量 M_E , M_E/M_c 的值小于10%,而实测冲量 I_E 总是大于计算结果 I_c ,并且多根柔爆索加载时 I_E/I_c 的值明显大于单根柔爆索加载时 I_E/I_c 的值。这表明由于公式(5)中没有考虑柔爆索爆炸后的相互作用等因素对冲量的贡献,计算所得结果偏小。为工程上使用方便,我们引入单位长柔爆索中铅壳等效质量 m^* 来计算爆轰产物相互作用等因素对冲量的贡献,即

表5 不同批次生产的柔爆索作用到 $\phi 30\text{mm}$ 靶上的冲量Tab.5 Impulse of different batch of mild detonating fuses act on $\phi 30\text{mm}$ targets

柔爆索根数 n	2	2	1	1
柔爆索距靶面距离 h (mm)	15	15	15	15
柔爆索间距 a (mm)	14	14	/	/
用第一批柔爆索实测冲量 I_E (g·m/s)	127.5	126.7	59.4	60.7
用第二批柔爆索实测冲量 I_E (g·m/s)	122.2	122.3	56.7	

$$I_c = \int_A \sum_i \frac{m^* u}{2\pi h_i} \cos^3 \alpha dA \quad (6)$$

就本实验结果而言,铅壳等效质量 m^* 可表示为 $m^* = 1.32m$ 。

一根柔爆索或两根柔爆索间距不变的条件下,在我们所做实验的柔爆索距靶面距离变化范围内 ($h = 5 \sim 20\text{mm}$), I_E/I_c 的值随 h 的增大稍有增加。两根柔爆索的高度不变时, I_E/I_c 的值随间距 a 的变化不明显。不同批次生产的柔爆索爆炸产生的冲量有一定差异。考虑到进行结构响应实验一般会用到多批次生产的柔爆索,精确标定 I_E/I_c 随高度的细小变化意义不大。

3 结论

(1) 粘附在靶面上的铅粒子质量小于打击到平面靶上铅粒子总质量的10%。

(2) 多根柔爆索爆炸产生的总冲量大于各根柔爆索冲量之和,表明柔爆索爆炸后的相互作用使得冲量增大。在计算柔爆索冲量时可采用铅壳等效质量 m^* ($m^* > m$) 来计及这种影响。

(3) 不同批次生产的柔爆索爆炸产生的冲量有一定的差异,就本实验所用的两个批次柔爆索而言,冲量相对偏差约为5%。

参考文献:

- [1] 赵国民,张若棋,汤文辉. 脉冲X射线辐照材料引起的汽化反冲冲量[J]. 爆炸与冲击, 1996, 16(3): 259
- [2] Kirkpatrick S W, Holmes B S. Structural Response of Thin Cylindrical Shells Subjected to Impulsive External Loads [J]. AIAA Journal, 1988, 26(1): 96
- [3] Lindberg H E. Deformation Ripple From The SPLAT Impulse Simulation Technique[R]. AD-A190861, 1987.

