

脉冲 X 光与其他模拟源的 结构响应等效性分析^{*}

彭常贤

(西北核技术研究所, 陕西西安 710024)

摘要: 分析了脉冲 X 光与电子束和化爆模拟引起的结构响应的冲量等效性原则。并以脉冲 X 光与柔爆索化爆作用硬铝圆柱壳的结构响应测量结果为实例, 对其进行了定量的等效性分析, 得出了较好的等效性结果。

关键词: 脉冲 X 光; 电子束; 柔爆索化爆; 结构响应; 等效性分析

中图分类号: O347.4

文献标识码: A

1 引言

研究脉冲 X 光辐射壳体引起的结构响应对于国民经济和国防事业的某些领域具有重要意义。然而脉冲 X 光辐射条件下的实测机会很少, 开展的大量实验研究是以电子束辐射和化爆加载来模拟。因此, 研究和建立脉冲 X 光与电子束和化爆模拟引起的结构响应的等效性原则就显得非常重要。

2 脉冲 X 光与电子束

脉冲 X 光与电子束对壳体的作用有下列主要同异点。

相同点: (1) 都属高能量密度粒子束辐射壳体, 并都在受辐射壳体表层内与物质相互作用损失能量而形成能量沉积; (2) 当脉冲 X 光与电子束都可认为是均匀的以及都是横向辐射壳体(即辐射方向与壳体轴线正交)时, 它们的辐射能在壳体半圆周上都是呈余弦分布的, 并由此可认为产生的能量沉积和喷射冲量也都是呈余弦分布的。

相异点: (1) 两者的能量沉积物理机制不同。脉冲 X 光在物质中主要是产生光电效应、康普顿散射和电子对生成效应等; 而电子束主要是产生电离效应和韧致辐射等。(2) 两者在物质中的能量沉积剖面不同。脉冲 X 光的能沉剖面峰值几乎就在壳体受辐射表面; 而电子束的能沉剖面峰值在壳体受辐射表面内的一定深度处(如: 理论计算表明, 初始能量 $E_0 = 0.3 \text{ MeV}$ 的电子, 在硬铝中的能沉峰值深度 $x_0 \approx 0.12 \text{ mm}$)。两者能沉剖面峰值所处的深度不同, 也就表明了两者能沉深度的不同。

从上面的分析可知, 论及脉冲 X 光与电子束的等效性只能是从两者对壳体产生的效应来考虑问题。产生的效应主要是材料响应和结构响应。因此进一步讨论等效性问题主要又可分 3 种情况:

(1) 使两者对壳体产生的材料响应和结构响应都等效, 这属于整体等效原则。它包括热激波形规律、应力峰值、作用时间、层裂效应、烧蚀厚度、喷射冲量、动态应变和屈曲特性等诸多方面都等效。但这实际上是不可能做到的。

(2) 材料响应特性等效。如果两者的热激波波形基本相同, 其应力峰值 σ_m 、作用时间 τ_0 基本相等,

^{*} 收稿日期: 2001-03-26; 修回日期: 2001-08-01

作者简介: 彭常贤(1940—), 男, 研究员。

并且表面烧蚀厚度 δ_f 基本相等,或两者的 δ_f 相对于壳体厚度 h 可忽略不计,则可认为材料响应等效。即有

$$\begin{aligned}\sigma_{mx} &\approx \sigma_{me} \\ \tau_{0x} &\approx \tau_{0e} \\ \delta_{fx} &\approx \delta_{fe} \text{ 或 } \delta_{fx}, \delta_{fe} \ll h\end{aligned}$$

上述条件在实际问题中是基本可满足的。

(3) 结构响应特性等效。对此先考虑下列 4 个方面的问题:

(a) 脉冲 X 光与电子束两者辐射加载壳体的喷射冲量 I 都呈余弦分布,也即

$$\begin{aligned}I_x &= I_{0x} \cos \theta \\ I_e &= I_{0e} \cos \theta\end{aligned}$$

只要两种束的均匀性较好,上述特性两者都是满足的。

(b) 两者对壳体受辐射表层的烧蚀厚度 δ_f 相对于壳体厚度 h 可忽略不计,也即

$$\delta_{fx} \ll h, \delta_{fe} \ll h$$

下面举例说明在脉冲 X 光和电子束辐射下,硬铝材料的烧蚀厚度 δ_f 。对脉冲 X 光辐射,有材料的 δ_{fx} (此处是汽化厚度)为

$$\delta_{fx} = \ln(KE_\phi/E_s)/(K\rho_0) \quad (1)$$

式中: K 为靶材的 X 光平均质量吸收系数, cm^2/g ; E_ϕ 为辐射能注量, J/cm^2 ; E_s 为靶材汽化热, $10^{-7} \text{ J}/\text{g}$; ρ_0 为靶材初始密度, g/cm^3 。 K 可按式计算

$$K = 1.38 \times 10^3 / T^{1.9} \quad (2)$$

式中: T 为 X 光黑体温度, keV 。

对曾进行的强脉冲 X 光实验的 T 值和 E_ϕ 值以及硬铝靶材 ($\rho_0 = 2.785 \text{ g}/\text{cm}^3$, $E_s = 12.84 \text{ kJ}/\text{g}$), 可算得: $K = 976 \text{ cm}^2/\text{g}$, $\delta_{fx} = 0.013 \text{ mm}$ 。

在电子束实验中,可由直接获得靶材在辐射后的绝对质量亏损 $\Delta m(\text{g})$,求得平均烧蚀厚度 δ_f ,有

$$\delta_{fe} = \Delta m / (A\rho_0) \quad (3)$$

式中: A 为靶材受辐射面积, $A = 11.34 \text{ cm}^2$ 。

表 1 列出了 8 炮硬铝靶材的电子束实验结果。在此处 δ_f 实为硬铝靶材的熔化厚度。表中还同时列出了电子束的能注量。

表 1 电子束辐射硬铝引起的烧蚀厚度

Table 1 Burning thickness of aluminum alloys radiated by electron beam

Parameter	Shot No.							
	95011	95019	95020	95021	95027	95028	95029	95030
$\Delta m/(\text{g})$	0.488	0.730	0.820	0.770	0.572	0.498	0.437	0.353
$E_\phi/(\text{J}/\text{cm}^2)$	139	198	229	223	151	144	139	115
$\delta_{fe}/(\text{mm})$	0.154	0.231	0.260	0.244	0.181	0.158	0.138	0.112

由上述给出的烧蚀厚度数据可知,如果考虑厚度为 4mm 硬铝壳体,脉冲 X 光的烧蚀厚度对壳体造成的影响完全可忽略不计;电子束的烧蚀厚度对壳体造成的影响也基本可忽略不计。

(c) 两者辐射壳体后,产生的温度升高及其持续时间的效应不足以影响壳体的整体力学性能(如壳体材料弹性模量 E 、屈服强度 Y_0 、壳体结构刚度系数 K 等)。即

$$f_x(E, Y_0, K, \dots), f_e(E, Y_0, K, \dots) \approx f_0(E, Y_0, K, \dots)$$

在实际问题中,对于能注量为几百焦耳每平方厘米、脉宽为几十至一百多纳秒的脉冲 X 光和电子束辐射壳厚为几毫米以上的壳体,上述要求是基本满足的。

(d) 两者辐射壳体后,在壳体内自由面处不出现因传入的热激波卸载而产生的层裂。

电子束实验结果表明,对于厚度为4mm的硬铝壳体,在能注量 $E_{\phi} \leq 200 \text{ J/cm}^2$ 情况下,壳体内自由面不曾出现层裂。因此在壳体结构响应研究的实际问题中,不出现层裂的条件是满足的。

如果上述4点条件都满足,那么只要设法使脉冲X光与电子束两者辐射加到一壳体上的喷射冲量最大值 I_0 基本相等,即 $I_{0x} \approx I_{0e}$,则可认为两者对壳体产生的结构响应是等效的。

3 脉冲X光与化爆

脉冲X光与柔爆索化爆的同异点为:

相同点:由于在柔爆索化爆的载荷设计中,可通过一定的理论计算和实验探索,调节柔爆索布索根数、布索间距和各根至壳体表面的距离等参数,而使得横向加载到壳体上的冲量 I 也可近似为余弦分布。

相异点:化爆作用到壳体材料中不存在能量沉积机制,只是直接冲击加载;对于柔爆索化爆,柔爆索外壳物质(如铅)微粒还会打到并粘上及陷入壳体表面,而稍增大壳体质量。

因此,讨论脉冲X光与柔爆索化爆的结构响应等效问题,如果能同时满足下列3点:

- (1) 脉冲X光对壳体材料的温升效应和烧蚀效应可忽略不计;
- (2) 柔爆索化爆中粘上和陷入的爆炸物质微粒对壳体质量的影响可忽略不计;
- (3) 两者都不使壳体产生层裂。

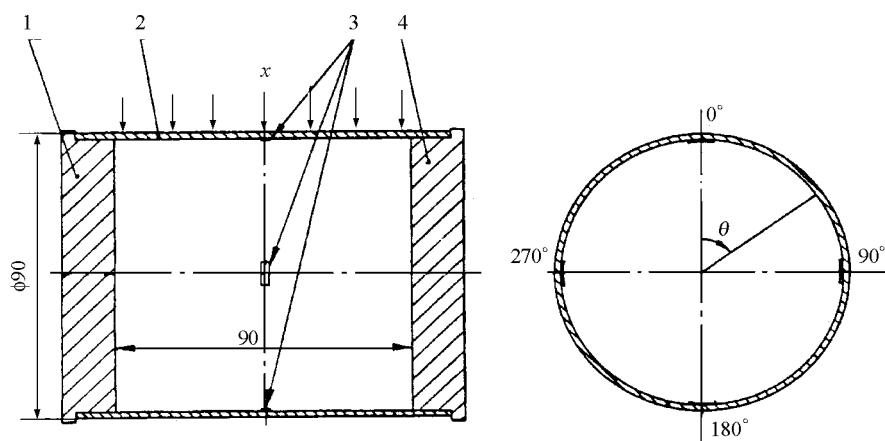
柔爆索爆炸加载的壳体结构响应实验结果表明,在壳体上被粘上和陷入的爆炸物质微粒质量小于壳体原始质量的1%;在 $500 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 及以下的冲量作用下壳体内表面也未曾出现层裂。因此上述3点在实际问题中是满足的。

那么,只要两者加到壳体母线 0° 方位的冲量最大值 I_0 基本相等也满足,就可认为脉冲X光与柔爆索化爆对壳体产生的结构响应是等效的。

4 壳体结构响应等效性的实例分析

以脉冲X光与柔爆索化爆的实验结果为例,进行壳体结构响应的等效性实例分析。

图1和图2分别为脉冲X光壳体结构响应的实验装置结构图和柔爆索化爆壳体结构响应的实验装置实物照片。图3和图4分别为各自的实测应变波形。



1. Left support, 2. Shell, 3. Strain gauges, 4. Right support

图1 脉冲X光壳体结构响应实验装置

Fig. 1 Experimental set-up of structural response of shell radiated by pulsed X-ray

对强脉冲 X 光源和两端固支硬铝圆柱壳实测得出:在喷射冲量 $I_0 = 310 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 时,壳体受辐射 0° 方位的动态应变峰值为 $\epsilon = 6.51 \times 10^{-3}$ 。

在曾进行的柔爆索化爆加载硬铝圆柱壳的结构响应实验中,加载冲量 $I_0 = 510 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 左右,壳体的外直径、受力跨度、安装方式都与脉冲 X 光实验的相同,只是壳厚不同。有关脉冲 X 光和柔爆索化爆实验的原始实测数据一并列在表 2 中。

由于在脉冲 X 光和柔爆索化爆的测量中,壳体的厚度不同,加载冲量 I 也不同。因此,必须将柔爆索化爆的测量数据按一定关系折算成脉冲 X 光测量时的情况(即 $h = 4.0 \text{ mm}$ 和 $I_0 = 310 \text{ Pa} \cdot \text{s}$)。

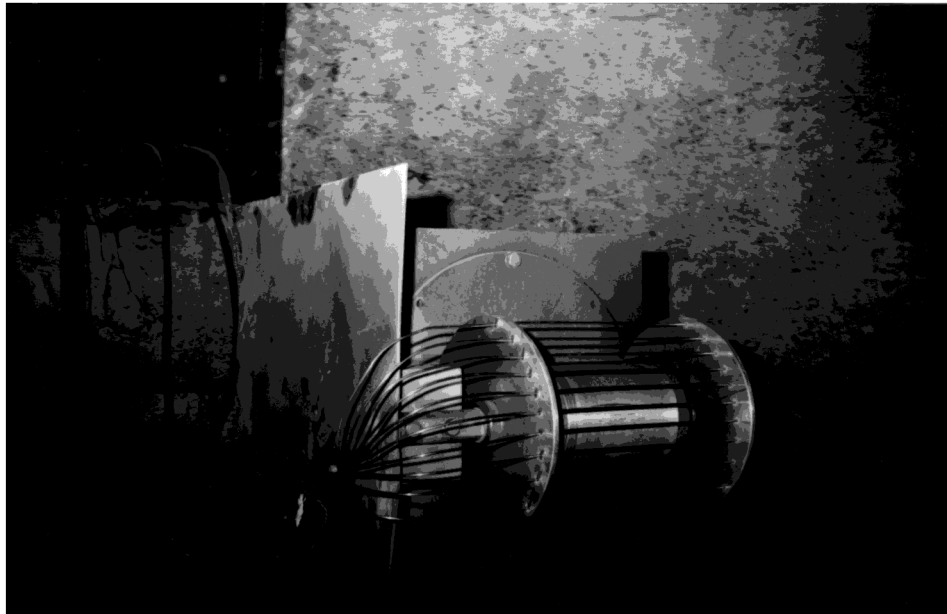


图 2 柔爆索化爆壳体结构响应实验装置(爆前)

Fig. 2 Experimental set-up of structural response of shell loaded by MDF explosion(before explosion)

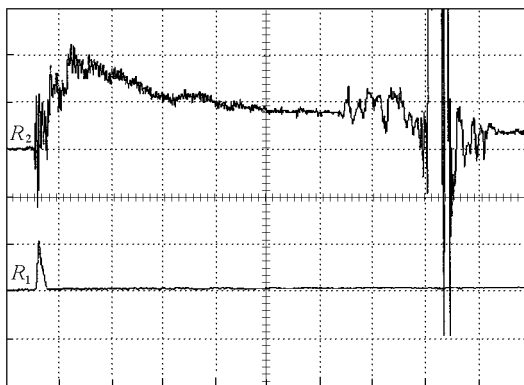
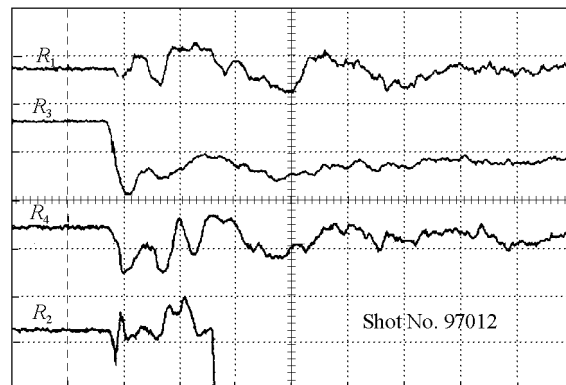


图 3 脉冲 X 光壳体实测
应变波形(0° 方位)

Fig. 3 The observed strain waves
in shell radiated by pulsed
X-ray(0° angle)



($R_1: 180^\circ, 1.0 \text{ V/div}; R_2: 90^\circ, 1.0 \text{ V/div};$
 $R_3: 0^\circ, 2.0 \text{ V/div}; R_4: 270^\circ, 1.0 \text{ V/div}; 0.1 \text{ ms/div}$)

图 4 柔爆索化爆壳体实测应变波形
Fig. 4 The observed strain waves in
shell loaded by MDF explosion

表 2 脉冲 X 光和柔爆索化爆壳体结构响应实测数据

Table 2 Measured data of structural response of shells

subjected to pulsed X-ray and MDF explosion

Loading source	Shot No.	Impulse $I_0/(\text{Pa} \cdot \text{s})$	Thickness $h/(\text{mm})$	Strain at $0^\circ \epsilon/(10^{-2})$
Pulsed X-ray		310	4.0	0.651
MDF Explosion	97005	510	2.5	1.885
MDF Explosion	97007	510	2.5	1.598
MDF Explosion	97008	510	2.5	1.557

根据采用“ABAQUS”有限元程序对上述几何尺寸的两端固支硬铝圆柱壳进行的结构响应数值模拟计算结果,可得出在 $I_0=510\text{Pa} \cdot \text{s}$ 时 0° 方位应变-壳厚(ϵ - h)的关系为

$$\epsilon \approx 0.7946[-0.1728(1/h)^2 + 63.5996(1/h) - 1.44 \times 10^4] \times 10^{-6}$$
 (4)

式中: h 单位为 m。

设 $\epsilon_{2.5}$ 和 $\epsilon_{4.0}$ 分别是壳厚 h 为 2.5mm 和 4.0mm 时的 0° 方位应变峰值,由(4)式可得出

$$\epsilon_{4.0} \approx 0.56\epsilon_{2.5}$$

由上述定量关系,可将柔爆索化爆的 $h=2.5\text{mm}$ 时的应变值折算到 $h=4.0\text{mm}$ 时的应变值(见表 3)。

由壳体数值模拟结果还可知,对 $h=4.0\text{mm}$,有 0° 方位应变 ϵ - I_ϵ 的关系为

$$\epsilon(I_\epsilon) \approx 0.75(-1.88I_\epsilon^2 + 1.78I_\epsilon - 1.14) \times 10^{-2}$$
 (5)

设 ϵ_{310} 和 ϵ_{510} 分别是冲量 I_0 为 $310\text{Pa} \cdot \text{s}$ 和 $510\text{Pa} \cdot \text{s}$ 时的 0° 方位应变峰值,由(5)式可得出

$$\epsilon_{310} \approx 0.733\epsilon_{510}$$

由上述定量关系,可将表 3 中的应变 ϵ 折算到 $I_0=310\text{Pa} \cdot \text{s}$ 时的值,就得到柔爆索化爆与脉冲 X 光作用的壳体以及冲量都完全相同时的应变数据(见表 4)。

表 3 柔爆索化爆中实测应变折算到 $h=4.0\text{mm}$ 的值

Table 3 Strain values for $h=4.0\text{mm}$ converted from

the measured values of MDF explosion

Loading source	Shot No.	Impulse $I_0/(\text{Pa} \cdot \text{s})$	Thickness $h/(\text{mm})$	Strain at $0^\circ \epsilon/(10^{-2})$
MDF Explosion	97005	510	4.0	1.056
MDF Explosion	97007	510	4.0	0.895
MDF Explosion	97008	510	4.0	0.872

表 4 柔爆索化爆中实测应变折算到 $h=4.0\text{mm}$ 、 $I=310\text{Pa} \cdot \text{s}$ 的值

Table 4 Strain values for $h=4.0\text{mm}$ and $I=310\text{Pa} \cdot \text{s}$ converted

from the measured values of MDF explosion

Loading source	Shot No.	Impulse $I_0/(\text{Pa} \cdot \text{s})$	Thickness $h/(\text{mm})$	Strain at $0^\circ \epsilon/(10^{-2})$
Pulsed X-ray		310	4.0	0.651
MDF Explosion	97005	310	4.0	0.774
MDF Explosion	97007	310	4.0	0.656
MDF Explosion	97008	310	4.0	0.639

比较表 4 中的柔爆索化爆的等效应变值与脉冲 X 光的实测应变值可知,两者是符合得较好的,偏差为 $1.8\% \sim 19.0\%$ 。

5 结 论

对于不同模拟加载源的结果,只要满足下列条件:

- (1) 加载源对壳体的脉冲加载都呈余弦分布;
- (2) 加载源对壳体受作用表层材料的损伤效应(如烧蚀、爆炸物冲击、侵蚀等)相对于壳厚 h 可忽略不计;
- (3) 加载源对壳体受作用表层材料的温度效应对壳体整体力学性能可忽略不计;
- (4) 加载源不使壳体产生层裂。

那么,不同模拟加载源作用壳体产生的结构响应的等效性条件就只有一个:加载的冲量最大值 I_0 相等。也即如果两者的 I_0 相同,则壳体产生的结构响应也相同。这就是结构响应的冲量等效性原则。

参考文献:

- [1] PENG Chang-xian, TAN Hong-mei, HU Ze-gen, et al. Experimental Studies of Blowoff Impulse Induced by Electron Beam with Different Materials and Different Energy Fluxes [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 1999, 13(1): 15-21. (in Chinese)
彭常贤, 谭红梅, 胡泽根, 等. 不同材料和不同能通量条件下电子束喷射冲量的实验研究 [J]. 高压物理学报, 1999, 13(1): 15-21.
- [2] PENG Chang-xian, TAN Hong-mei, HU Ze-gen, et al. The Dynamic Response of the Built-in Cylindrical Shell Irradiated by Pulsed X-ray [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 1999, 13(Suppl): 373-375. (in Chinese)
彭常贤, 谭红梅, 胡泽根, 等. 两端固支圆柱壳在脉冲 X 光辐照下的动力学响应 [J]. 高压物理学报, 1999, 13(增刊): 373-375.
- [3] PENG Chang-xian, TAN Hong-mei, HU Ze-gen, et al. Dynamic Responses of Shells Irradiated by Pulse Electron Beams [J]. Explosion and Shock Waves, 2001, 21(1): 21-25.
彭常贤, 谭红梅, 胡泽根, 等. 三种壳体在脉冲电子束辐照下动力学响应的实验研究 [J]. 爆炸与冲击, 2001, 21(1): 21-25.

ANALYSIS OF EQUIVALENCE FOR STRUCTURAL RESPONSE INDUCED BY PULSED X-RAY WITH OTHER ANALOGUE SOURCES

PENG Chang-xian

(Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: The equivalence of structural response induced by pulsed X-ray with analogues of electron beam and explosion are analyzed. The measured results of structural response in aluminum alloy cylindrical shells subjected to pulsed X-ray and MDF explosion are used in quantitative analyses of equivalence. The fairly good results of equivalence are obtained.

Key words: pulsed X-ray; electron beam; MDF explosion; structural response; analysis of equivalence