第9卷 第1期 高 压 物 理 学 报 Vol. 9, No. 1
1995年3月 CHINESE JOURNAL OF HIGH PRESSURE PHYSICS Mar., 1995

“闪光二号”电子束辐照平板靶产生热击波的实验研究

彭常贤 王占江 王 伟 王 征 胥永亮 程桂淦

(西北核技术研究所,西安 710024)

摘要 热击波是电子束辐照靶材料时在其内产生材料响应的一个重要力学现象。论述了近两年来我们在“闪光二号”装置上进行电子束辐照平板靶产生热击波的实验研究。使用的靶厚为2.8～6.5 mm,靶材为LY-12铝,靶上能通量为87～152J/cm²。实验结果表明,实测热击波应力峰值为0.35～2.0GPa,热击波平均作用时间约为0.29μs,平均半高宽约为0.14μs,平均上升时间约为0.10μs.

关键词 电子束 材料响应 热击波 平板靶 石英晶体传感器

中图法分类号 O347.3

1 引 言

当电子束辐照固体材料时,由于在其受照部位表层瞬间沉积大量能量,并瞬间形成高温高压,使其局部材料熔化(或汽化)、喷射和成坑。由于高温高压和动量守恒,将同时在材料内形成一热击波并向里传播。当热击波传播到靶后自由面时,将卸载而形成一拉伸波,并往往可使靶后自由面层裂。成坑和层裂将造成材料的破坏。热击波的形成、材料的成坑和层裂称为材料响应。另一方面,熔、汽化物质的喷射将对整个靶结构施加一个冲量载荷,可使其产生应变、弹塑性变形和动屈曲等,这些效应称为结构响应。

研究电子束辐照靶产生的材料响应和结构响应对于国防事业的某些领域具有重要意义。近两年来,我们在本所的“闪光二号”装置上进行了电子束辐照硬铝平板靶产生热击波的实验研究,并取得了较满意的结果。

2 测量原理

2.1 探头基本原理

测量中采用分流保护环式石英压电晶体作为传感器(见图1)。平板靶材料为LY-12硬铝,压电晶体安装在靶板后中央,其负电极面紧贴靶后表面,正内电极面上装有一铝电极,以便引线。R_1和R_2分别为正内电极和正外电极(即保护环)回路的负载电阻。当电子束辐照靶产生的热击波传播到压电晶体表面时,将产生动态压电电荷,在回路中形成压电电流,在负载R_1上则产生一电压幅度,此电压经电缆传输到屏蔽测试间里的示波器上而被记录。

1993年5月31日收到原稿,1994年3月26日收到修改稿。

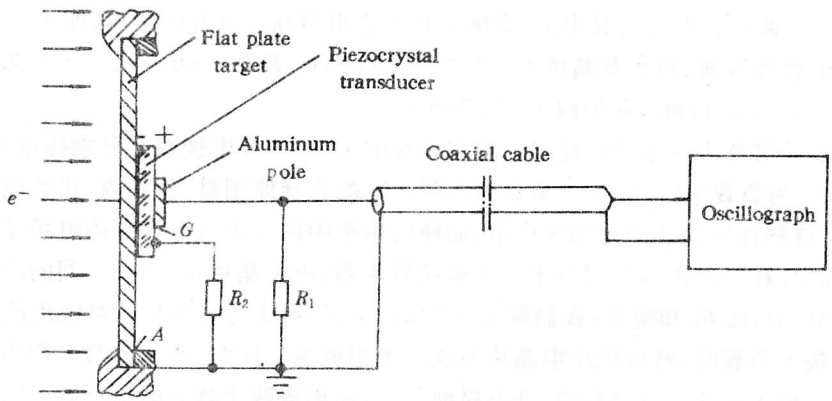

图 1　热击波测量原理图

Fig. 1　Schematic diagram of thermal shock wave measurement

2.2　靶板物理设计

靶板受辐照直径为 ϕ600mm，最大安装直径为 ϕ68mm。靶厚下限一般应由最大能量电子的有效射程来确定。其质量有效射程可按下式来计算：

$$R_{0e} = G_1 E_0^{G_2 - G_3 \ln E_0} \quad (g/cm^2) \tag{1}$$

式中：E_0 为电子动能，单位为 MeV；G_1、G_2 和 G_3 为拟合常数，与靶的材料有关。而距离有效射程为：

$$X_{0e} = R_{0e}/\rho_0 \quad (cm) \tag{2}$$

式中：ρ_0 为靶材料密度。

一般靶厚下限 h_{min} 取值比 X_{0e} 再大 30%～50%，以防电子穿透。靶厚上限 h_{max} 一般可取 $h_{max} = 4h_{min}$。最后设计中确定，选用的靶板厚度 h 的系列值为：2.0，2.8，3.8，5.0，6.5，8.0，9.0mm。

热击波在靶内传播时，为防止边侧稀疏扰动的影响，晶体传感器内电极面边缘至靶工作直径边缘的距离 AG（见图 1）必须大于边侧稀疏影响距离 L_c。有：

$$L_c = h \cdot \mathrm{tg}a + C\tau \tag{3}$$

式中：h 为靶厚，a 为稀疏扰动卸载角，C 为稀疏传播速度，τ 为热击波作用时间。a 可按下式计算：

$$\mathrm{tg}a = \{(C/D)^2 - [(D-u)/D]^2\}^{1/2} \tag{4}$$

式中：u、D 分别为靶材中的粒子速度和击波速度。对于硬铝靶材、热击波最大应力 σ_m = 2.5GPa、h = 9mm、τ = 0.4μs 的情况，可算得 a = 12.5°，L_c = 4.2mm。已知 AG = 25mm，所以有：$AG > L_c$。

2.3　石英压电晶体传感器

石英晶体采用 X 切割，外直径 d = 20mm，厚度为 3.5mm。在晶片"+"极面上刻有一绝缘环（环宽 0.1mm），内电极面外直径为 ϕ100mm。内电极面的作用是测量压电电流，外电极面（即保护环）的作用是消除边侧稀疏效应对内电极面的影响。

晶片外直径确定后，其厚度 L 按下列原则来选定：为确保在应力波作用下晶片产生

的是一维应变，一般有：晶片的最大厚度 L_{max} 应满足 $d/L_{max}\geqslant 5$，即 $L_{max}\leqslant 4$mm，而晶片的最小厚度 L_{min} 应满足 $L_{min}\geqslant L_\tau$，其中 L_τ 为热击波的作用时间 τ 所占的距离，即 $L_\tau=\tau C_q$，C_q 为晶体材料的弹性波速，对石英晶体 $C_q=5.70\times10^5$cm/s。若取 $\tau=0.4\mu$s，即 $L_\tau=2.3$mm。因此有 2.3 mm$\leqslant L\leqslant$4mm。我们取 $L=3.5$mm。

传感器的接线方式采用分流式。即在晶片的正内、正外电极面上分别接电阻 R_1 和 R_2（见图 1），R_1 为负载电阻，R_2 为平衡分流电阻。R_2 的选择原则是：使正内、正外电极面处于相同电位，这样在保护环中无场强作用，而使内电极中的压电电荷产生的电场是一维的。

压电晶片在应力作用下相当于一个电荷发生器。由于晶片正、负极之间的绝缘电阻很高（可达 $10^{12}\Omega$），而 R_1 却很小（我们取 $R_1=10\Omega$），所以，可认为晶片是短路输出的。当正、负电极之间接上负载时，就可把压电晶片看成一个恒流源。同时，晶片本身又相当于一个平板电容器。由于晶片正电极有内、外电极面之分，便形成两个独立的恒流源回路。因此可画出如图 2 所示的等效电路。

图 2 中：I_1、C_1 分别为晶片的负电极与正内电极构成的恒流源电流和电容，I_2、C_2 分别为晶片的负电极与正外电极构成的恒流源电流和电容，C_3、C_4 分别为负电极引线与正内、正外电极引线之间的分布电容，R_L 为信号输出电缆的特性阻抗。可调节 R_2 使图 2 中 a 点和 b 点等电位。当忽略 C_1、C_3 和 C_2、C_4 分别对 R_1 和 R_2 的分流作用，并设 A_1 和 A_2 分别为正内、正外电极的面积，则有：$R_2=A_1R_1/A_2=3.3\Omega$。

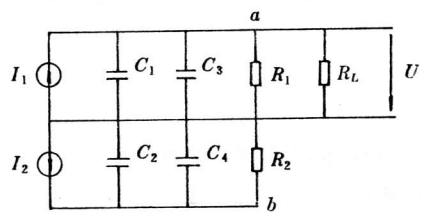

图 2 压电晶体传感器等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of the piezocrystal transducer

图 2 中的 I_2 网络只起改善压电传感器性能的作用，并不输出测量信号。输出测量信号的只是 I_1 网络。下面对 I_1 网络进行分析计算。

$$C_1=\varepsilon_0\varepsilon_q A_1/L \quad (\mathrm{F}) \tag{5}$$

式中：ε_0 为真空介电常数，有 $\varepsilon_0=8.85\times10^{-14}$ F/cm。ε_q 为压电晶体相对介电常数，对石英有：$\varepsilon_q=4.5$。A_1 和 L 的单位分别用 cm^2 和 cm。可算得：$C_1=0.894\times10^{12}$F。

$$C_3=1.11L_D\times10^{-12}/[4\ln(d_0/r)] \quad (\mathrm{F}) \tag{6}$$

式中：L_D 为引线长度(cm)，取 $L_D=10$cm。d_0 为两平行引线间的距离(cm)，取 $d_0=1$cm，r 为引线半径(cm)，取 $r=0.04$cm。可算得：$C_3=0.862\times10^{-12}$F。

令 $$C=C_1+C_3=1.76\times10^{-12}\ (\mathrm{F})$$

热击波频响可如下估算：

$$f=0.40t_r \quad (\mathrm{Hz}) \tag{7}$$

式中：t_r 为热击波上升时间，取 $t_r=0.1\mu$s，可算得：$f=4\times10^6$Hz。则电容 C 的阻抗为：

$$Z_C=1/2\pi fC=2.27\times10^4\Omega$$

信号输出电缆用 SYV-50-7-1-5，其特性阻抗 $R_L=50\Omega$。则图 2 中 R_1 与 R_L 的并联电阻 R 为：$R=R_1R_L/(R_1+R_L)=8.33\Omega$。可见，有 $Z_C>>R$，即电容 C_1 和 C_3 对恒流源 I_1 的分流作用可忽略不计。则由图 2 可得出传感器的输出信号电压 U 为：

$$U = I_1 R \tag{8}$$

2.4 晶体中应力与输出电压关系

对于 X 切割的石英晶体片，当其工作满足下列条件：(1)处于一维应变状态，(2)压电电场是一维的，(3)晶体的材料是线弹性的，(4)晶体的介电常数不变，(5)晶体导电率等于零，(6)晶体产生的应变是无穷小的，(7)应力波瞬时到达整个晶体片上，(8)压电极化强度与所施加在晶体上的应力成正比。则晶片中的应力可如下计算[1]：

$$\sigma_q = LI_1/(KA_1C_q) \quad (\text{GPa}) \qquad (t < T_q) \tag{9}$$

式中：L 和 A_1 分别为晶片厚度(cm)和正内电极面积(cm^2)；K 为晶体的电流系数，对石英有：$K = 2.04 \times 10^{-7}$ ($C/cm^2 \cdot GPa$)[2]；I_1 为晶体的输出电流(A)；$T_q = L/C_q$ 为应力波在晶体中的传播时间。

由式(8)和(9)可得：

$$\sigma_q = LU/(KA_1C_qR) = 0.460U \quad (\text{GPa}) \qquad (t < T_q) \tag{10}$$

当从实测热击波波形中判读出电压幅度 U(V)，则可求得石英中的应力 σ_q。

2.5 靶中应力换算

根据应力波在不同介质界面处的透、反射理论，在硬铝靶中，入射到硬铝靶与石英晶体的界面处的应力(也即所要测量的应力)可如下求得：

(1)　$\sigma_a \leqslant \sigma_{aH}$ 和 $\sigma_q \leqslant \sigma_{qH}$

σ_{aH}和 σ_{qH}分别为靶材和石英晶体的 Hugoniot 弹性限。此种情况也即靶板和石英晶体都工作在弹性变形区。对硬铝靶材和石英晶体分别有：$\sigma_{aH} = 0.54$GPa 和 $\sigma_{qH} = 4.7$GPa。此时可由下式求得靶中入射波的 σ_a[13]：

$$\sigma_a = \sigma_q/T_{aq} \quad (\text{GPa}) \tag{11}$$

式中：T_{aq}为应力波在硬铝靶与石英晶体界面处的透射系数。有：

$$T_{aq} = 2/(1 + m_{aq}) \tag{12}$$

式中：m_{aq}为硬铝靶与石英晶体的波阻抗比。此时有：

$$m_{aq} = \rho_{0a}C_a/(\rho_{0q}C_q) \tag{13}$$

式中：ρ_{0a}为靶材的初始密度，对硬铝有：$\rho_{0a} = 2.785 g/cm^3$；C_a 为靶材弹性波速，有 $C_a = 5.25 \times 10^5 cm/s$；$\rho_{0q}$为石英晶体的初始密度，有 $\rho_{0q} = 2.65 g/cm^3$。

在此种情况下，可算得：$m_{aq} = 0.968$，$T_{aq} = 1.016$。可见，硬铝与石英基本上是阻抗匹配的，只是石英比硬铝稍"硬"。

则由式(11)可算得 σ_a。

(2)　$\sigma_a > \sigma_{aH}$ 和 $\sigma_q \leqslant \sigma_{qH}$

此种情况即靶材工作在塑性变形区，而石英晶体工作在弹性变形区。此时 σ_a 可由下几式联立求得[4]：

$$u_q = \sigma_q/\rho_{0q}C_q \tag{14}$$

$$u_a = \{-2a_{0a} + 4S_a u_q \pm [4(a_{0a} - 2S_a u_q)^2 - 16S_a(S_a u_q^2 - a_{0a}u_q - \sigma_q/\rho_{0a})]^{1/2}\}/(8S_a) \tag{15}$$

$$D_a = a_{0a} + S_a u_a \tag{16}$$

$$\sigma_a = \rho_{0a} D_a u_a \tag{17}$$

上诸式中：a_{0a}、S_a 为靶材的 Hugoniot 常数；u_a、u_c 分别为靶材和石英中的粒子速度。

需要指出的是：在 $\sigma_a > \sigma_{aH}$ 和 $\sigma_q \leqslant \sigma_{qH}$ 时，由于硬铝靶材在弹塑性区的应力-应变关系为递增硬化情况（或可简化为线性硬化情况）以及边界条件为突加载荷性质，因此在硬铝靶材中的一定 σ_a 范围内，将会出现弹性前驱波和塑性波分开的“双波结构”。但是由于石英晶体仍工作在弹性变形区，所以传播到石英晶体中的热击波将又变成单一的弹性波，如我们所实测到的那样（见图 3 和图 4）。

在由石英晶体中的实测热击波形反推换算硬铝靶材中的热击波的过程中，如果我们逐点地换算出靶材中的整个波形，将会得出双波结构的波形（如果在该 σ_a 应力范围内双波结构客观上是存在的话）。但是在这里的数据处理中，为简单起见，只由石英中的应力峰值 σ_q 换算出最感兴趣和最重要的硬铝靶材中的应力峰值 σ_a，而不想去求整个波形 $\sigma_a(t)$。

在靶材的双波结构中，可以肯定，弹性前驱波的应力峰值 σ_{ae} 要比尾随其后的塑性波的应力峰值 σ_{ap} 小得多，并且峰值 σ_{ap} 和峰值 σ_q 在时间上是对应的。因此，所要求得的靶材中应力峰值 $\sigma_a = \sigma_{ap}$。

由于在这里所讨论的是递增硬化材料和突加载荷情况，靶材中的弹性前驱波和塑性波都是属于强间断情况，因此击波关系式(17)对于双波结构可认为是适用的，问题在于在双波结构的不同时间 t 处，式(17)中的 $D_a(t)$ 和 $u_a(t)$ 是不同的。况且我们这里的数据处理中只求塑性波中的一个点，即应力峰值 σ_{ap}，因此用式(17)是没问题的。

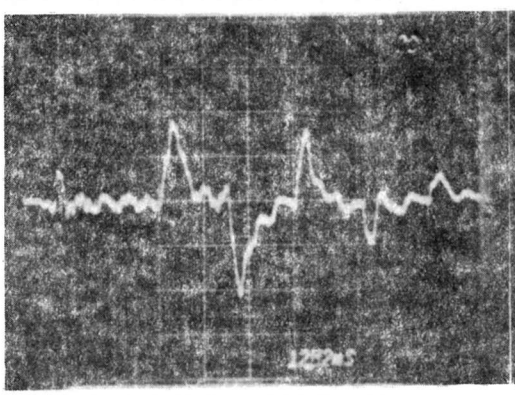

图 3 实测热击波波形(90216 炮)

Fig. 3 The observed thermal shock wave of shot No. 90216

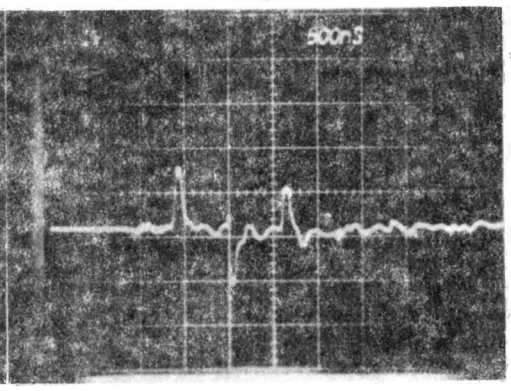

图 4 实测热击波波形(90227 炮)

Fig. 4 The observed thermal shock wave of shot No. 90227

2.6 最大输出参数计算

对于石英晶体片，一般最大工作应力 $\sigma_{qm} \leqslant 2.5\text{GPa}$。否则，$K$ 不再为常数。则由此可得出此石英晶体传感器的最大输出电压 U_m 为：

$$U_m = \sigma_{qm}/0.460 = 2.5/0.460 = 5.44 \quad (\text{V})$$

则最大输出电流 I_{1m} 为：

$$I_{1m} = U_m/R = 5.44/8.33 = 0.653 \quad (\text{A})$$

而应力波最大作用时间 τ_m 可近似地如下估算：

$$\tau_{in} \approx L/C_q = 0.35/(5.70 \times 10^5) = 0.614\ (\mu s)$$

因此，必须注意，用此石英晶体传感器进行热击波测量时，一般传感器的输出幅度不应大于 5.44V，热击波的作用时间不应大于 0.614μs。

3　抗干扰措施

"闪光二号"电子束装置是目前国内束流最强的一台脉冲相对论电子束加速器。由于功率大，放炮的瞬间产生的干扰也是很强的；而热击波又是 μs 级的早期信号。因此测试系统能否抗得住强大的干扰，这也是测试成败的关键问题之一。具体地说，一是测试系统不能被干扰信号破坏；二是测试信号不能被干扰信号湮没而无法分辨。在此实验中，主要的干扰有电磁脉冲干扰、漂移管磁场干扰、电耦合和公共阻抗耦合等。采取的主要抗干扰措施有：

（1）抗电磁脉冲干扰。

①对整个测试系统采取全屏蔽；②屏蔽系统和信号系统均单端接地。

（2）对电源的抗干扰。

①加噪声隔离变压器，以隔离掉直流地电位；②加铁氧体磁珠和电源滤波器，以防止从电源处引入电磁波干扰。

（3）对信号电缆串接共模噪声扼流圈，用以减少共模噪声对测试信号的干扰。

（4）对触发信号采用隔离变压器和限幅器，分别用以隔离掉公共阻抗引起的直流地电位和防止过高的触发信号对测试信号电缆的串扰。

通过对干扰信号的实测发现，在漂移管内，电磁脉冲干扰幅度可达 3～5V。在采取了一系列防护措施后，可将电磁脉冲干扰幅度抑制在 0.1～0.3V 以下。

4　测量结果及分析

采用上述研制的测试系统，在"闪光二号"装置上，成功地测量了电子束辐照平板靶产生的热击波。图 3 和图 4 分别为 90216 炮和 90227 炮的电子束热击波波形。从图中可知，有两个极性相反的波形。其中第一个波形为石英晶体片前表面处的入射波，当晶体片负（正）极面与靶后表面相接，第一个波为正（负）极性。第二个波形为第一个波形在晶体片后表面反射引起的。实验目的是测量靶中的热击波应力，所以应判读第一个波形。至于图中的第二个正极性波形，是晶体片后表面处的反射波再传播到晶体片前表面时引起的。同理，第二个负极性波形，是晶体片前表面反射波又传播到晶体片后表面处时再次反射引起的，如此来回反射，波形幅度越来越小。

表 1 中列出了 7 炮热击波测量中的电子束装置本身的性能参数及靶上束斑直径和能通量等。在表 1 中：L_0 为靶至阳极距离，V_0 为二极管阴阳极间隙电压，I_0 为二极管电流，E_T 为二极管总能量，τ_0 为电子束脉宽，E_{mo} 为电子最大能量，D_0 为靶上束斑直径，E_ϕ 为靶上能通量。E_ϕ 由下式求得：

$$E_\phi = 4K_D E_T/(\pi D_0^2) \tag{18}$$

式中：$K_D = 0.80$，为电子束机器的能量效率系数。

表1 电子束参数

Table 1 Electron beam parameters

Shots No.	L_0 /(cm)	V_0 /(mV)	I_0 /(mA)	τ_0 /(ns)	E_T /(kJ)	E_{m0} /(MeV)	D_0 /(cm)	E_φ /(J/cm^2)
90211	16	0.180	0.473	84.2	28.5	0.810	17.2	98
90216	16	1.216	0.500	84.9	46.3	1.216	17.6	152
90224	16						17.2	
90227	16						17.2	
90229	16						17.2	
90231	16	0.820	0.492	75.5	24.6	0.820	17.0	87
90233	16	0.767	0.590	73.1	32.7	0.767	17.0	115

Note: In shots No. 90224, 90227 & 90229, the measured system of electron beam parameters have no recordations.

表2 热击波测量参数

Table 2 Data from thermal shock wave measurements

Shots No.	h /(mm)	U /(V)	σ_q /(GPa)	σ_a /(GPa)	t_0 /(μs)	$\tau_{1/2}$ /(μs)	τ /(μs)	t_r /(μs)	T_q /(μs)
90211	3.81	0.824	0.379	0.373	0.63	0.13	0.26	0.10	0.60
90216	6.51	3.130	1.222	1.227	1.06	0.17	0.33	0.13	0.62
90224	6.50	2.261	1.040	1.042	1.05	0.16	0.35	0.12	0.63
90227	2.81	2.435	1.120	1.122	0.45	0.13	0.27	0.09	0.62
90229	5.01	0.870	0.400	0.394	0.75	0.16	0.29	0.13	0.62
90231	3.82	0.783	0.360	0.354	0.65	0.12	0.27	0.10	0.63
90233	2.78	4.226	1.944	1.954	0.44	0.13	0.27	0.08	0.62

表2中列出了从7炮实测波形中判读或换算出的热击波有关实测数据。在表2中：h为靶厚，U为热击波幅度，σ_q为石英中应力峰值，σ_a为靶中应力峰值，t_0为热击波到达时间，$\tau_{1/2}$为热击波半高宽，τ为热击波作用时间，t_r为热击波上升时间，T_q为两波间距。其中U、t_0、$\tau_{1/2}$、τ、t_r和T_q等参数是由实测热击波波形上直接判读得出的；σ_q由式(10)换算出；σ_a由式(11)和(17)换算出。

由对图3、图4等实测热击波波形和表1、表2中的数据进行定性和定量分析，可得出下述看法：

(1) 热击波波形中的BC段(见图5)为热击波由靶板前表面传播到达石英晶体片前表面的时间t_0。所实验的四种不同厚度的靶板中，t_0的实测值与理论值都基本吻合。例如，对90227炮，$t_{0实}=0.45\mu s$，$t_{0理}=0.51\mu s$。

(2) 波形的CE段对应于热击波在晶体中的传播时间T_q。近似地有$T_{q理}=0.614\mu s$。由表2的数据可知，T_q的实测值与理论值是较好符合的。

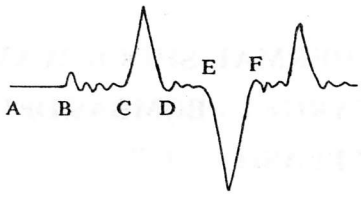

图 5　实测热击波示意图

Fig. 5　Sketch of the measured thermal shock wave

（3）实测波形都是一正一负变化的波系，这符合压电晶体片反映应力波形的规律。

（4）实测热击波的正波峰的电压值都在计算的最大输出电压 5.44V 以下，换算出的石英晶体中的应力值也都在最大应力 2.5GPa 以下。这都符合 X 切割石英压电晶体应力测量系统的物理规律。

（5）对于靶厚基本相同、电子束能通量也相近的炮，实测热击波应力峰值也相近。例如，90221 炮和 90231 炮的数据即如此。

（6）各炮的热击波作用时间 τ 和上升时间 t_r 都比较接近，且随着靶 上能通量的增大，τ 和 t_r 都稍有增大。这也是符合物理规律的。

上述六点分析也同时说明：实验中所测波形确实为电子束辐照靶材产生的热击波，而决非干扰。

5　结　论

（1）在"闪光二号"上进行的电子束辐照平板靶产生热击波的实验研究是成功的。所测得的热击波波形和数据是可信的。

（2）虽然"闪光二号"电子束装置在运转中产生的电磁脉冲等干扰很严重，但当对整个测试系统采取了全面的、行之有效的抗干扰措施后，是能够可靠地测到 μs 级的热击波信号的。

（3）对于靶上能通量为 87～152J/cm^2 和硬铝平板靶厚度为 2.8～6.5mm，实验得出：热击波应力峰值为 0.35～2.0GPa，热击波的平均作用时间约为 0.29μs，平均半高宽约为 0.14μs，平均上升时间约为 0.10μs。

感谢本所电子束实验室邱爱慈等同志们的大力支持和通力合作。

参　考　文　献

1　Graham R A. Neilson F W, et al. J Appl Phys, 1965, 36(5): 1775
2　吴嵩毓. 爆炸与冲击, 1985, 5(4): 61
3　王礼立. 应力波基础. 北京：国防工业出版社, 1985
4　经福谦, 等. 实验物态方程导引. 北京：科学出版社, 1986

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE THERMAL SHOCK WAVE PRODUCED IN THE FLAT PLATE TARGETS BOMBARDED BY ELECTRON BEAM ON "FLASH — Ⅱ"

Peng Changxian, Wang Zhanjiang, Wang Wei,
Wang Zheng, Xu Yongliang, Cheng Guigan
(*Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an* 710024, *China*)

ABSTRACT The thermal shock wave is an important mechanic phenomenon of the material response produced in the target material bombarded by electron beam. In this paper, the experimental studies of the thermal shock wave produced in the flat plate targets bombarded by electron beam on "FLASH- Ⅱ" equipment during the recent years are discussed. The target material is LY-12 aluminum alloy with thicknesses of 2.8～6.5 mm. The range of energy fluxes on targets is 87～152 J/cm^2. Experimentally measured stress peaks of the thermal shock waves is 0.35～2.0 GPa, average acting time of the thermal shock waves about 0.29μs, average semi-high width about 0.14μs, and average rise time about 0.10μs.

KEY WORDS electron beam, material response, thermal shock wave, flat plate target, quartz crystal transducer.