

电子束辐照硬铝产生热 击波的实验研究

彭常贤

本文介绍了1 MV电子束辐照LY-12硬铝产生热击波的实验中所采用的石英压电测量系统,并给出了电子束热击波和层裂的实测结果。结果表明,层裂的实测值与计算值基本符合。

一、引言

电子束、X光束和激光束等高能密度粒子束,当其照射固体材料时,尽管它们与材料相互作用的机理各不相同,但都将在材料前表面内产生瞬间的能量沉积,使材料前表面汽化(或熔化)、喷射和成坑;由于动量守恒,将同时在材料内产生一热击波,并往往可使材料后自由面层裂。成坑和层裂将造成材料的破坏。近年来,我们在1 MV电子束装置上,对LY-12硬铝靶,进行了这一重要物理现象的实验研究。电子束的主要性能参数为:二极管电压约0.67 MV,电流约16 kA,半高宽约25 ns,电子动能范围为0~0.6 MeV,平均动能为0.267 MeV,靶上束斑直径约10 mm,阴阳极间距离调至12 mm,二极管真空度约 6.7×10^{-3} Pa。

二、靶后自由面层裂估算

入射热击波在靶后自由面将反射一稀疏波,两波相互作用形成一拉伸波。超过一定强度的拉伸波可使后自由面内出现层裂。由入射、反射波相互作用的图解可知,仅考虑拉伸波的作用时,入射波可简化为如下形式:

$$\sigma_i(t) = \sigma_m \left(1 - \frac{t}{\tau} \right) \quad (1)$$

图1为入射波在靶后自由面O处反射后形成拉伸波的情形。设反射波阵面已传播到距自由面为 δ 的C点,并设入射波阵面到达自由面时刻为拉伸波的时间坐标起点,则在C点处合成的拉伸波峰值 σ_r 为

$$\begin{aligned} \sigma_r &= DC = AC - BC \\ &= \sigma_m - \sigma_m \left(1 - \frac{2\delta}{c_0\tau} \right) = \frac{2\sigma_m}{c_0\tau} \delta \end{aligned} \quad (2)$$

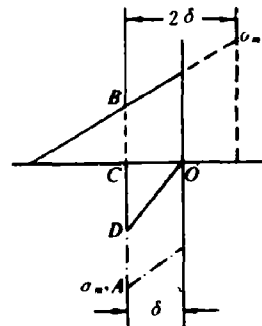


图1 拉伸波的形成

对硬铝, 有 $c_0 = 5.328 \text{ km/s}$ 。我们采用比较接近实际情况的动态断裂的累积损伤判据来估算层裂, 并使用文献[1]所给出的有关实验拟合常数, 即

$$\begin{cases} \int_0^t f(\sigma) dt = k_3 \\ f(\sigma) = \begin{cases} (\sigma_T - \sigma_0)^a & \text{当 } \sigma_T > \sigma_0 \\ 0 & \text{当 } \sigma_T < \sigma_0 \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

$$k_3 = k_1 k_2 \quad (4)$$

$$k_1 = \left(\frac{T_s - T}{T_s - T_0} \right)^c \quad (5)$$

式中: σ_T 为拉伸应力; t_s 为层裂时间; k_1 、 σ_0 和 a 为与材料有关的拟合常数, $\sigma_0 = 0.425 \text{ GPa}$, $a = 2.02$; k_1 和 k_2 为 k_3 的组成因子, $k_2 = 3.800 \times 10^{11} \text{ Pa}^{2.02} \cdot \text{s}$; $T_s = 966 \text{ K}$ 为铝的熔点; T 为材料波后温度; $T_0 = 293 \text{ K}$; $C = 0.5$ 为系数。

从式(3)可知, 当 $\sigma_T < \sigma_0$, 不管拉伸应力作用时间多长, 材料也不会层裂。而当 $\sigma_T > \sigma_0$ 时, 也要积累一段时间, 在满足式(3)的积分后才会出现层裂。故在拉伸波中存在一个起始时间 t_0 (对应的材料厚度为 δ_0), 对于 $t < t_0$, 这一部分拉伸波对引起层裂累积效应不起作用。显然, 当 $t = t_0$, 有 $\sigma_T - \sigma_0 = 0$ 。将式(2)代入可得

$$\delta_0 = \frac{c_0 \tau \sigma_0}{2 \sigma_m}$$

而

$$t_0 = \frac{\delta_0}{c_0} = \frac{\tau \sigma_0}{2 \sigma_m}$$

因此, 对这里定义的时间 t 的起点, 式(3)中的积分下限应取为 t_0 , 即

$$\int_{t_0}^{t_s} \left(\frac{2 \sigma_m}{c_0 \tau} \delta - \sigma_0 \right)^a dt = k_3 \quad (6)$$

设对应于 t 时刻的材料裂缝处距自由面距离为 δ , (即首次层裂片厚度), 则式(6)可写成:

$$\int_{\delta_0}^{\delta_s} \left(\frac{2 \sigma_m}{c_0 \tau} \delta - \sigma_0 \right)^a d\delta = c_0 k_3 \quad (7)$$

积分上式可得

$$\delta_s = \frac{c_0 \tau \sigma_0}{2 \sigma_m} + \left[(a+1) c_0 k_3 \left(\frac{c_0 \tau}{2 \sigma_m} \right)^a \right]^{1/a+1} \quad (8)$$

若取 $T = 500 \text{ K}$, $\tau = 0.08 \mu\text{s}$, $\sigma_m = 1.4 \text{ GPa}$ (τ 、 σ_m 值为本实验所得的一组典型值), 得 $\delta_s = 0.49 \text{ mm}$ 。

三、测试系统

1. 概述

硬铝靶即二极管阳极, 其工作直径为 $\phi 30 \text{ mm}$ 。当测热击波波形时, 在靶后表面中央安有石英压电晶体片作为传感器(图2); 当做靶的层裂实验时, 靶后表面为自由面。

石英晶体片采用X轴切割。为使晶体片产生一维应变, 一般其直径与厚度之比应不小于5。本晶体片的直径和厚度分别为21.8和4.3mm。为使晶体片具有牢固电极和良好导电性,

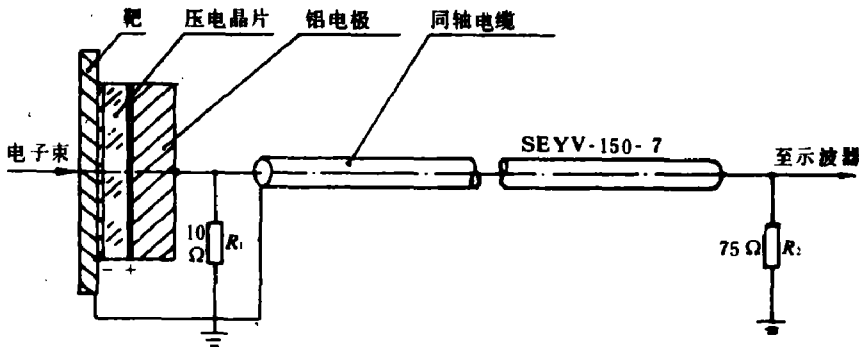


图2 压电传感器输出电路

在晶片两端面先沉积铬再真空镀银。

晶体片的安装取正定位，即晶片负电极面紧贴靶后表面。本晶片为全电极型，一般采用如图2所示的输出电路。输出电缆为SEYV-150-7，长23m，单根特性阻抗75Ω。对整个测量系统采用了一系列防电磁波干扰措施，可将干扰信号抑制在几毫伏以下。

2. 石英传感器输出特性及应力换算²

对于x切割石英晶片，其工作满足一维应变、线弹性、介电常数不变和电导率等于零等假设后，其前电极面应力为

$$\sigma_{q0} = \frac{0.1I}{Akc_q} l \quad (\text{GPa}) \quad (t > T_q) \quad (9)$$

式中： l 和 A 分别为晶片厚度和电极工作面积，由于束斑直径 d_s 小于晶片直径 d_c ，若近似取波在铝靶中的扩散角为45°，则有 $A = \pi(d_s + 2h)^2/4$ ， h 为靶厚，取 $h = 1.2, 1.5, 2.0, 2.8, 4.0 \text{ mm}$ ； $k = 2.04 \text{ pC/m}^2 \cdot \text{Pa}$ 为晶片的电流系数³， $c_q = 5.72 \text{ km/s}$ 为晶片在 x 方向的纵向弹性波速； $T_q = l/c_q = 0.752$

μs 为波在晶片中的传播时间。本电子束在硬铝中产生的热冲击波底宽小于 $0.2 \mu\text{s}$ ，故满足 $t < T_q$ 。此外，当 $\sigma_e > 2.5 \text{ GPa}$ ， K 不再为常数，故对于石英晶片，测量应力不应大于 2.5 GPa 。

压电晶片在应力作用下相当于一个电荷发生器，其绝缘电阻 $R_0 \gg 10^{10} \Omega$ 。当其正负电极间接上负载 R_L 时（图2），可把压电晶片看为一恒流源。同时，晶片本身又相当于一个平板电容器 C_1 。设 C_2 和 R_L 分别为晶片极间引线电容和电缆输入特性阻抗，则可得如图3所示的等效电路。有：

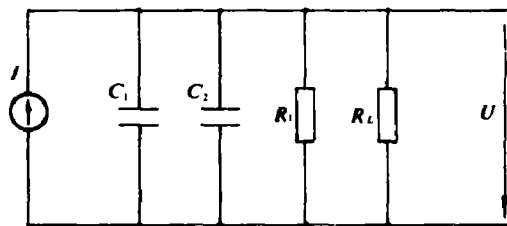


图3 压电晶片传感器等效电路

$$C_1 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_q A}{l} \quad (10)$$

$$C_2 = \frac{1.11 \times 10^{-12} l_d}{4 \ln(d/r)} \quad (11)$$

$$f_c = 0.40/t, \quad (12)$$

式中: $\epsilon_0 = 8.85 \text{ pF/m}$ 和 $\epsilon_q = 4.5$ 分别为真空介电常数和石英晶片相对介电常数; l 、 r 和 d 分别为晶片电极的引线长度、引线半径和两平行引线间的距离; f_c 和 t_r 分别为应力波频响和上升时间。图3 $C_1 = 2.91 \text{ pF}$, $C_2 = 1.19 \text{ pF}$, $t_r = 0.08 \text{ }\mu\text{s}$, $f_c = 5.0 \text{ MHz}$, 则有 $z_c = 7.76 \text{ k}\Omega$, 而 $R = 8.82 \text{ }\Omega$, 可见 $z_c \gg R$, 则有: $U \approx IR$ 。所以

$$\sigma_{q0} = \frac{0.1l}{AkRc_q} U \quad (\text{GPa})$$

由应力波在不同介质界面的透反射理论有

$$\sigma_{q0} = T_{aq} \sigma_a \quad (13)$$

而

$$T_{aq} = \frac{2}{1 + m_{aq}} = 1.011 \quad (14)$$

$$m_{aq} = \frac{\rho_a c_a}{\rho_q c_q} = \frac{2.785 \times 5.328}{2.65 \times 5.72} = 0.979 \quad (15)$$

式中: σ_a 为从硬铝靶入射到 aq 界面的热击波应力, 即要测量的应力; T_{aq} 为波在 aq 界面的透射系数; m_{aq} 为硬铝与石英的波阻抗比; ρ_a 和 ρ_q 分别为硬铝和石英的密度; c_a 和 c_q 分别为硬铝和石英的弹性波速。最后可得

$$\sigma_a = \frac{0.1l}{AkRc_q T_{aq}} U \quad (\text{GPa}) \quad (16)$$

四、实测结果及分析

1. 热击波测试

图4 为实测热击波波形, 图5 为应力峰值随靶厚变化曲线。由图4可知, 记录了两个极性相反的波形。其中第一个波形为石英晶体片前极面处的入射波。当晶体片负极面与靶后表面相接时, 第一个波为正极性; 当晶体片正极面与靶后表面相接时, 第一个波为负极性。第

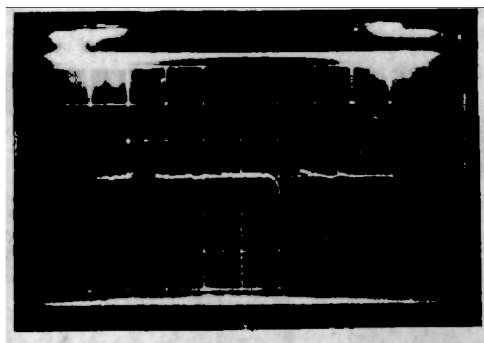


图4 实测热击波波形

$h = 1.2 \text{ mm}$, 5 V/div , $0.2 \text{ }\mu\text{s/div}$

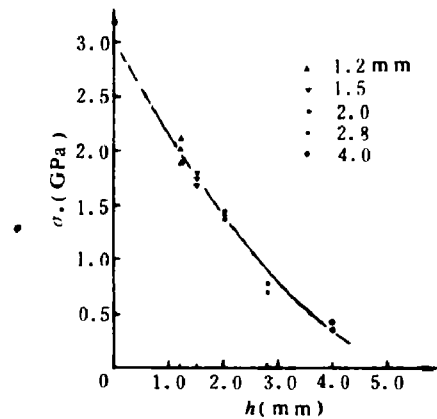


图5 应力峰值随靶厚变化曲线

二个波形为第一个波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, 因此应判读第一个波形

表1给出了根据实测波形判读和处理出的有关数据。图5为根据表1数据作出的应力峰值随靶厚变化曲线。由图5可见,应力峰值随靶厚增大而减小。

表1 实测热击波数据表

序号	探头号	靶厚 h (mm)	波形 幅度 U (V)	靶中应 力峰值 σ_0 (GPa)	波 形 半 高 宽 $\tau_{1/2}$ (μ s)	波 形 作 用 时 间 τ_0 (μ s)	两 波 间 距 T_0 (μ s)	备 注
1	3	1.2	5.37	1.86	0.054	0.150	0.748	5 V/div, 下同。
2	4	1.2	6.12	2.11	0.057	0.147	0.739	
3	9	1.2	5.78	2.00	0.065	0.159	0.748	
4	5	1.5	5.53	1.74	0.062	0.147	0.737	2 V/div
5	11	1.5	5.25	1.65	0.068	0.164	0.731	5 V/div, 下同。
6	17	1.5	5.45	1.71	0.071	0.153	0.742	
7	7	2.0	5.10	1.38	0.071	0.150	0.739	
8	12	2.0	5.25	1.42	0.070	0.167	0.737	
9	14	2.0	5.17	1.40	0.079	0.173	0.742	
10	19	2.0	5.05	1.37	0.054	0.147	0.739	
11	10	2.8	3.25	0.710	0.062	0.143	0.738	
12	13	2.8	3.60	0.786	0.062	0.153	0.722	
13	15	4.0	2.25	0.369	0.062	0.153	0.748	
14	16	4.0	2.35	0.385	0.065	0.150		因洗印相技术原因, 反射波未得到。

2. 层裂实验

图6和图7给出了三种厚度靶的成坑和层裂情况。表2给出了实测层裂片厚度和成坑深度。实验表明:对靶厚1.2 mm,由成坑和层裂的联合作用,可使靶穿孔;对靶厚1.5~2.0 mm,靶不出现穿孔,但层裂片仍脱落;对靶厚2.8~4.0 mm,可出现靶的层裂片脱落和不脱落。

表2还给出了由图5的光滑实测应力曲线得出的实测入射应力峰值,并用此数据算得四



(a) $h = 1.2$ mm



(b) $h = 2.0$ mm



(c) $h = 2.8$ mm

图6 靶迎照面成坑情况



(a) $h=1.2$ mm, 出现穿孔 (b) $h=2.0$ mm, 层裂片脱落 (c) $h=2.8$ mm, 层裂片未脱落

图7 靶后自由面层裂情况

种靶厚的层裂片厚度计算值。由表2可见层裂片厚度的计算值与实测值基本符合。

表2 靶成坑和层裂数据表

序号	靶厚 h (mm)	实测成坑深度 W (mm)	实测层裂片厚度 δ (mm)	实测应力峰值 σ_a^* (GPa)	计算层裂片厚度 δ (mm)	备注
1	1.2		0.42	2.0	0.38	迎照面成坑与后自由面层裂的联合作用使靶穿孔, W 难定
2	1.2	0.62	0.41			
3	1.5	0.65	0.41	1.75	0.42	
4	1.5	0.79	0.42			
5	1.5	0.80	0.39			
6	1.5	0.75	0.43			
7	1.5	0.60	0.42	1.40	0.49	
8	2.0	0.57	0.44			
9	2.0	0.59	0.40			
10	2.0	0.60	0.44			
11	2.0	0.50	0.39			
12	2.0	0.58	0.42	0.88	0.68	层裂片仅鼓起, 未脱落
13	2.8	0.56	0.46			
14	4.0	0.65	0.18	0.35		σ_a^* : σ_0 (式3), 故未算 δ , 下同。
15	4.0	0.52				

五、结 论

1. 对实验所用电子束, 在厚度为1.2~4.0mm的LY-12硬铝靶中, 实测热击波应力峰值约为2.0~0.38GPa, 半高宽约0.064 μ s, 作用时间约0.154 μ s。应力峰值随靶厚增大而明显减小, 但半高宽和作用时间却变化不大。

2. 对于前述参数热击波,在前述厚度的靶后自由面内,可引起厚度为0.4~0.5mm的一次性层裂。

3. 对实验所用的电子束,在硬铝靶迎照面处的成坑深度为0.62mm左右,成坑面积等效直径约为10mm,坑剖面大体为边浅中深的“漏斗”型。

4. 靶迎照面成坑和后自由面层裂造成对材料的破坏。破坏程度随靶厚增大,大体可分为严重、中等和轻度三种情况,它们对应的主要破坏特征分别为穿孔、层裂片脱落和层裂片不脱落(但外鼓或内部可能有裂缝)。

5. 用实测热击波应力和累积损伤判据得出的层裂片厚度计算值与层裂片厚度实测值基本符合。

6. 由于本实验的电子束斑面积较小,靶中受力状态不完全符合一维应变条件,所得数据可认为是半定量的。

参加本工作的还有程桂淦、杨中华、胥永亮、徐建波等;实验得到三室的大力支持;本室林俊德、李孝兰对方案提出过宝贵意见。

参 考 文 献

- [1] Larson, A. R., *LA-5619-MS*, (1974).
- [2] Graham, R. A., Neilson, F. W. et al., *J. Appl. Phys.*, **36**(5)(1965), 1775.
- [3] 吴嵩毓, *爆炸与冲击*, **5**(1)(1985), 61.

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE THERMAL SHOCK WAVE PRODUCED IN ALUMINUM ALLOY BOMBARDED BY ELECTRON BEAM

Peng Changxian

Abstract

A measurement system of piezoquartz used in the experimental studies of the thermal shock wave produced in LY-12 Al alloy bombarded by 1 MV electron beam is reported in this paper. The measured results of the thermal shock wave and the spallation are also given. The results show that measured values of the spallation are approximately in agreement with the calculated.