

脉冲电子束产生喷射冲量的实验研究

李清源 王国庆 吴军 栗培义
(北京强度环境研究所, 北京 100076)

摘要 本文简述了利用脉冲电子束产生喷射冲量的实验技术和喷射冲量的测量技术。文中提供了弹性悬臂梁式冲量计的设计理论,并对自行研制的冲量计进行了动态标定,标定结果表明设计理论是可行的。利用1MeV脉冲电子加速器的电子束对铝合金试件进行轰击,得到了熔化材料的喷射冲量与电子束轰击能量间的拟合曲线。

关键词 电子束 冲量 实验

一、引言

以脉冲形式辐射的能量与物质相互作用时,将能量在短期内传给物质表面层,或者说,辐射能被表面层物质吸收。由于辐射能与物质相互作用时间甚短,如短到亚微秒,表面层内熔化甚至气化了物质因等熵膨胀过程而在物质中引起所谓的热击波,它是在微秒级时间内发生的,人们称之为脉冲辐射在材料中引起的“早期效应”。等熵膨胀引起熔化和气化物质迅速喷射对未熔化材料产生反冲,导致未熔化材料运动,这种运动是在毫秒级内发生的,人们称之为“后期效应”。脉冲的X射线束,电子束和激光束与物质相互作用时,会产生热击波与喷射冲量这两种力学效应。

要研究未熔化材料的运动,需要了解脉冲辐射能量与其产生的喷射冲量间的关系,这一课题受到世界上辐射能武器效应研究者的关注。本文从实验方面研究入射的脉冲电子束能量与其在铝合金靶材料上产生的喷射冲量之间的关系时,采用了弹性梁机械变形方法测量喷射冲量,一是简单可靠;二是机械变形的出现时刻远远迟后于电子束轰击铝合金靶板时产生的高噪声环境;三是与光纤测量技术和激光干涉测量技术相比,比较经济;四是“弹性梁”可多次使用。

二、悬臂梁式冲量计

一端固支一端自由的悬臂梁式冲量计及其相应的坐标系表示在图1中。 l 为梁长, m_0 为梁的总质量,则均匀梁的单位长度质量为 m_0/l ;梁自由端有一集中质量为 m_1 (靶质量与固定靶用的夹具质量之和),在 m_1 上作用一脉冲载荷 $p(t)$,它对时间的积分,即所谓的“喷射冲量”。设梁为均匀梁,梁宽为 b ,梁高为 h ,则梁截面惯性矩 J_z 为

$$J_z = bh^3/12 \quad (1)$$

选择高弹性合金为梁的制作材料,目的是使梁在本实验范围内,即 $p(t)$,量值的范围内始终处于弹性变形范围。基于上述假定,冲量计的理论设计公式简述如下。

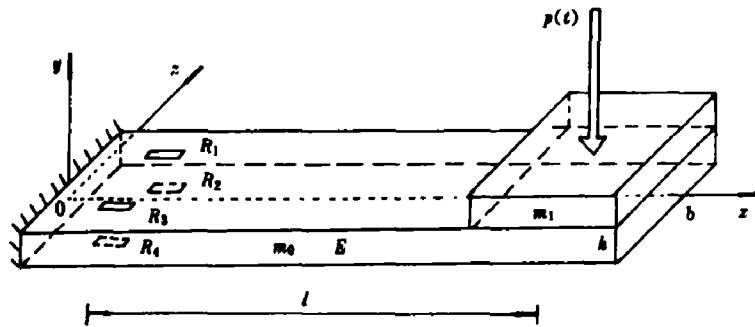


图1 均匀悬臂梁、集中质量、动态载荷、应变电桥位置及相应的坐标系示意图
Fig. 1 Scheme of the uniform-cantilever-beam, concentrated mass, dynamic load, strain bridge position and corresponding coordinates

由材料力学知道,均匀悬臂梁某截面 x 处的动态弯矩 $M(x,t)$ 为

$$M(x,t) = p(l,t)(l-x) \quad (2)$$

梁在 x 截面处的弹性挠度 $y(x,t)$ 为

$$y(x,t) = y(l,t) \cdot (3lx^2 - x^3)/2l^3 \quad (3)$$

式中

$$y(l,t) = p(l,t) \cdot l^3/3EJ_x \quad (4)$$

E 为梁材料的弹性模量, EJ (后文中略去下标 x) 为梁横截面相对于 z 轴的弯曲刚度。

假定:在动载荷 $p(l,t)$ 作用下,选取公式(3)作为均匀悬臂梁一阶弹性振动振型之近似表示式,则梁的动能 T 为

$$T = \frac{1}{2} \tilde{M} [\dot{y}(l,t)]^2 \quad (5)$$

式中

$$\tilde{M} = m_1 + \frac{33}{140} m_0 \quad (6)$$

称为等效质量,“ \cdot ”表示对时间的一阶导数。

梁的弹性应变能 U 为

$$U = \frac{M^2(0,t) \cdot l}{6EJ} \quad (7)$$

式中

$$M(0,t) = p(l,t) \cdot l \quad (8)$$

根据能量守恒定律与动量-冲量定律,可得冲量 I_m 与梁固支端应变 $\epsilon(0,t)$ 之间的关系式

$$\int \epsilon_{\max}(0,t) dt = \frac{3I_m}{(EMbh)^{1/2}} \quad (9)$$

式中

$$\epsilon_{\max}(0,t) = \frac{p(l,t)lh}{2EJ} \quad (10)$$

为梁固支端上(或)下表面处的应变。

三、冲量计的标定

对冲量计进行了动态标定,目的是验证冲量计的设计理论是否正确,研制的冲量计是否可用,冲量计的安装是否恰当以及用于脉冲电子束轰击铝靶产生喷射冲量数据之处理。动态标定采用了简单易行的落球撞击法。分短线(约 1.5m)传输标定和长线(30 多米)传输标定两种。因为脉冲电子束轰击靶板的实验区与双层铜网屏蔽的测量间相距 30 多米。

1. 短线传输标定

落球撞击标定实验装置简图见图 2。标定实验步骤简述如下:

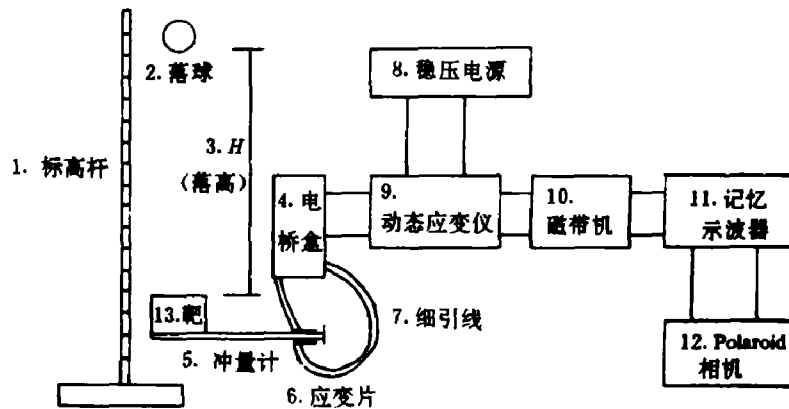


图 2 落球撞击标定实验示意图

Fig. 2 Scheme of the fall-ball impact for the calibration experiment.

1. Height post, 2. Fall-ball, 3. Height of the ball, 4. Bridge-box, 5. Impulse-meter, 6. Strain gauge, 7. Lead, 8. Constant voltage power, 9. Dynamic strain gauge, 10. Magnetic type unit, 11. Memory oscilloscope, 12. Polaroid camera, 13. Target.

(1)用千分之一精度天平称落球质量;

(2)用米尺测量落高 H ,按公式 $v^2 = 2gH$ (g 为重力速度)求出落球与靶的撞击速度 v ,从而获得落球动量 mv ;

(3)由图 2 表示的实验装置,即落球、冲量计、电桥、动态应变仪、磁带机、高频响示波器和相机,可得到冲量计固支端的应变-时间曲线 $\varepsilon(0, t)$;

(4)由公式(10)可得落球对靶的撞击力随时间的变化

$$p(t, t) = \frac{2EJ}{hl} \varepsilon(0, t) \quad (10)$$

(5)由冲量定义

$$I_m = \int_0^t p(t) dt \quad (11)$$

由 DM902 记忆示波器的 $\varepsilon(0, t)$ 采样求得冲量

$$I_m = \sum_{i=1}^N p_i(t) \cdot \Delta t_i \quad (N = 10) \quad (12)$$

2. 长线传输标定

长线传输标定的原理和步骤与短线标定相同。不同的是:短线标定使用 1.5m 长的四芯屏蔽电缆,长线标定使用了脉冲电子加速器实验室内的屏蔽管道中的四根射频电缆。除从动态应变电桥到电桥盒,电桥盒到电缆接线柱的引线采用 0.5mm 的塑料皮铜导线外,信号的测量传输均用射频电缆。

落球撞击标定结果绘于图 3 中,左边为短线传输标定结果,右边为长线的结果。由图 3 看出,短线传输标定实验数据(及其平均值)分布在 45°线附近。长线传输标定也近似线性,只是比短线传输信号偏低。因此,在处理数据时,应将长线传输信号乘以因子 β : $\beta = 1.474$ 。

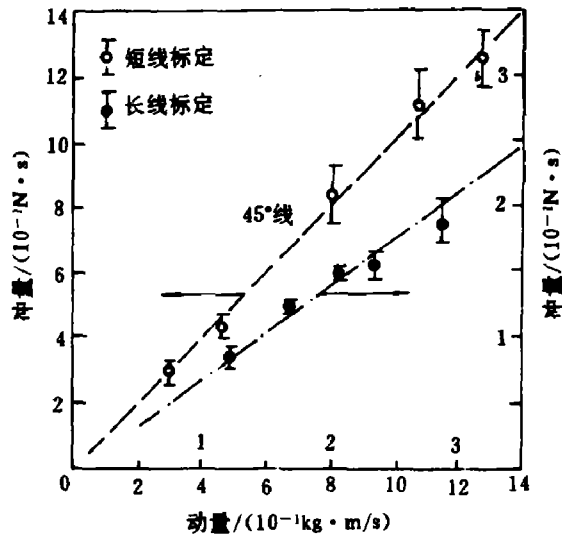


图 3 冲量计之落球撞击标定曲线

Fig. 3 Calibration curves of the fall-ball impact for impulse gauge

• Short-cable, • Long-cable.

四、脉冲电子束产生的喷射冲量

图 4 示意地表示了利用脉冲电子束轰击铝靶产生的喷射冲量的实验原理图。靶置于水平放置的真空漂移筒内,筒中心线,靶之对称轴线和脉冲电子加速器的轴线保持准直。靶为圆盘状铝合金,通过夹具与冲量计自由端牢固连接。当靶表面遭受电子束轰击时,靶表面层物质熔化或气化,它们进行等熵膨胀时(即喷射),有一个冲击力作用在冲量计之自由端,在经过若干时间以后,冲量计开始产生机械振动,使冲量计固支端上下表面处的电桥产生一个不平衡电压输出。该输出信号经过自制的真空密封插座由真空漂移筒进入“测量屏蔽钢管—转接筒—屏蔽钢管—双层屏蔽间”内的射频电缆,并由双层屏蔽间内的动态应变仪、磁带记录仪和记忆示波器—Polaroid 相机进行测量、记录、显示、采样和拍照。

图 5 表示典型的动态应变信号。由图看出,在脉冲电子束未轰击靶板之前,应变全桥输出为零。当电子束轰击靶板的瞬间,在实验区产生的 $\gamma(X)$ 射线将在应变电桥及其引线中引起干扰电流(输出),如图 5 中向下的尖锐脉冲。从 $\gamma(X)$ 射线出现时刻算起,大约经过 7ms,冲量计才开始对电子束产生的喷射冲量作出反应,即开始产生机械弯曲振动变形。我们关心的是第一个半周波形,它反映了电子束轰击引起的喷射冲量。

几乎与 $\gamma(X)$ 射线出现的“同时”,还产生电磁脉冲(在真空漂移筒内称内电磁脉冲)。但是,测量系统中采用的磁带机记录与重放,磁带机中的滤波器可以将高频电磁振荡滤掉,所以在图 5 中的波形上反映不出高频电磁波干扰的影响。

在实验中一直对 $\gamma(X)$ 射线的剂量与剂量率进行着监测。受轰击铝靶背面的 $\gamma(X)$ 剂量之平均值约为 0.1161~0.1290C/kg,剂量率约 $10^5 \sim 10^6$ C/kg/s; 经过用铅板屏蔽后,

到达电桥处的 $\gamma(X)$ 射线剂量分别为 $2.838 \times 10^{-3} \text{C/kg}$ (冲量计固支端上表面处的平均值) 与 $1.29 \times 10^{-3} \text{C/kg}$ (冲量计固支端下表面处的平均值), 相应的剂量率分别为 $5 \times 10^4 \text{C/kg/s}$ 和 $2.2 \times 10^4 \text{C/kg/s}$. 计算了 $\gamma(X)$ 射线在电桥及其引线上激发的干扰电流, 得到的干扰电流平均值约为 0.12V , 同 21 个实验值之平均值 0.21V 相差不大.

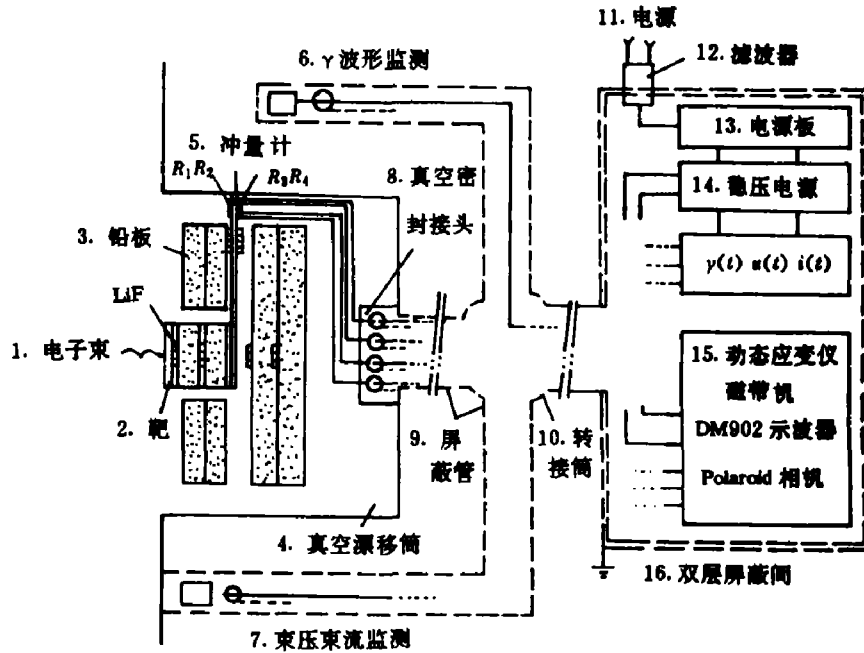


图4 电子束产生喷射冲量之实验原理图

Fig. 4 Scheme of the blow-off impulse experiment generated by pulse electron beam
 1. Electron beam, 2. Target, 3. Pb-plate 4. Vacuum shift cylinder, 5. Impulse-meter,
 6. γ -ray pulse measurement, 7. Voltage and current pulse measurement,
 8. Vacuum-seal connector, 9. Shield steel tube, 10. Connecting cylinder,
 11. A. C. power, 12. Filter, 13. Patch panel, 14. Constant voltage power,
 15. Recording instruments, 16. Dual screen room.

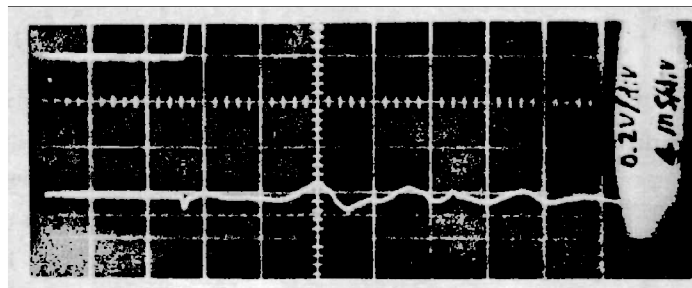


图5 典型的动态应变信号

Fig. 5 Typical dynamic strain-signal

尽管在实验中采用了各种措施, 诸如电桥桥路输出引线和连接线尽可能短, 所有传输线路采用双屏蔽、始端浮地和铅板屏蔽等, 以防止或减少干扰, 但仍不可能完全将干扰噪声排除. 为检验上述措施的有效性, 本文专门设计了干扰实验: 在原来的冲量计 ($h =$

5.08mm)的“后面”、与原冲量计成 120°角的位置处安装了一个新冲量计($h=3.45\text{mm}$)。这样,可由原计上的靶板承受电子束轰击,由新计及其上贴的电桥承受散射和透射的 $\gamma(X)$ 射线与电磁脉冲的干扰。该干扰除在引线 and 应变计中引起干扰电流外,散射与透射的 $\gamma(X)$ 射线对新计的轰击会引起新计的弯曲振动应变。为使新计感受的弯曲振动应变不被干扰电流湮没,所以在干扰实验中采用的新计厚度比原计厚度要薄。因此,在数据分析处理时,将新计的干扰应变还原为原计的干扰应变时,需乘以修正因子 ξ , $\xi = (h_{\text{原}}/h_{\text{新}})^2 = 0.464$ 。

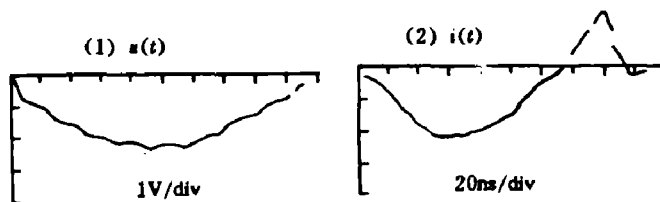


图 6 电子束的电压波形(1)和电流波形(2)

Fig. 6 Voltage signal (1) and current signal (2) of the pulse electron beam



图 7 典型束斑照片

Fig. 7 Typical pattern of the beam-spot

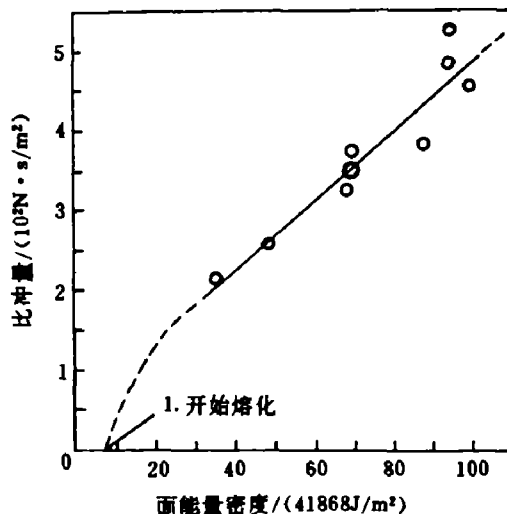


图 8 比冲量与面能量密度间的实验关系

Fig. 8 Experimental relationship between the special impulse and energy density

1. Sharting of melt.

在所作的四个干扰实验中,干扰引起的弯曲应变的第一波峰的平均值约占电子束喷射冲量引起原计弯曲应变的第一个波峰的 8.72%,说明弯曲应变信号中干扰只占不到 10%。

实验时还监测了脉冲电子束的电压波形与电流波形,即 $u(t)$ 与 $i(t)$,它们的典型波形见图 6 所示。由下式可得脉冲电子束的平均面能量密度 φ 为

$$\varphi = \frac{1}{A} \int_0^t u(t) \cdot i(t) dt \quad \text{或} \quad \varphi = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^N u_i \cdot i_i \cdot \Delta t_i \quad (\text{取 } N = 10) \quad (13)$$

式中 A 为束斑面积。图 7 为典型束斑图案。

由前述的动态应变测量结果可换算得到喷射冲量,再除以束斑面积就得到所谓比冲量,于是获得了比冲量与电子束平均面能量密度之间一一对应的数据。用最小二乘法得到一条拟合曲线,见图 8。该拟合曲线可近似地用线性关系式表示如下

$$\hat{I}_m = 0.042 \times \varphi + 0.65 \quad (14)$$

式中 \hat{I}_m 为比冲量 ($N \cdot s/m^2$), φ 为面能量密度 (J/m^2), 公式 (14) 与实验散布的最大相对误差约 23%, 使用范围 $\varphi = 1.465 \times 10^6 \sim 4.187 \times 10^6 J/m^2$ 。

五、结 论

本文是对脉冲电子束引起喷射冲量的实验技术研究之初步尝试。根据文中提供的弹性悬臂梁式冲量计的设计理论,研制并安装了弹性冲量计,并做了动态标定。鉴于脉冲电子束实验的高噪声干扰,实验中采用了一些屏蔽与防护技术,并专门设计了检验高噪声环境的干扰实验。最后得到了一条喷射冲量与电子束面能量密度间的实验拟合曲线。

参 考 文 献

- [1] 袁希光等,传感器技术手册,国防工业出版社,(1986),84-304.
- [2] 清华大学电力系高压技术专业编,冲击大电流技术,科学出版社,(1978),136-190.
- [3] Stefansky, Tibor, et al, Material Response Measurements Using Pulse Electron Beam, AD-729 346 July (1971).
- [4] Donald G. Pellinen et al, Rogowski Coil for Measuring Fast, High-Level Pulsed Currents, *Rev. Sci. Instrum.* 51 (11)(1980), 1535-1540.

EXPERIMENTAL STUDIES OF BLOW-OFF IMPULSE GENERATED BY A PULSE ELECTRON BEAM

Li Qingyuan, Wang Guoqing, Wu Jun, Li Peiyi

(Beijing Institute of Structures and Environment Engineering, Beijing)

ABSTRACT Experimental technique of the blow-off impulse generated by a pulse electron beam and the measurement technique of the blow-off impulse are simply described. The design theory of elastic cantilever type impulse-meter is presented, the impulse-meter is dynamically calibrated and then the design theory is demonstrated to be available. Aluminum samples are bombarded by an electron beam produced by an 1 MeV pulse electron accelerator and the experimental fit curve between electron beam energy density and the blow-off impulse of aluminum target is obtained.

KEY WORDS electron beam, impulse, experiment.