

文章编号: 1001-4322(2003)01-0089-05

# 脉冲软 X 光辐射三种材料的喷射冲量实验研究\*

彭常贤<sup>1</sup>, 谭红梅<sup>1</sup>, 林 鹏<sup>1</sup>, 李宏杰<sup>2</sup>, 孟 刚<sup>2</sup>

(1. 西北核技术研究所, 陕西 西安 710613; 2. 北京机电研究所, 北京 100076)

**摘 要:** 在强光一号脉冲加速器上进行了国内首次的实验室软 X 光辐射三种材料的喷射冲量研究。结果表明,在能量为(0.2~0.33) keV、平均脉宽为 39ns 左右的 X 光辐射下,对灰漆、白漆和硬铝,在能注量分别为(92~152) J/cm<sup>2</sup>、(115~136) J/cm<sup>2</sup> 和(163~192) J/cm<sup>2</sup> 时,它们的冲量耦合系数分别为(0.61~0.80) Pa·s/(J·cm<sup>-2</sup>)、(0.58~0.97) Pa·s/(J·cm<sup>-2</sup>) 和(0.61~0.84) Pa·s/(J·cm<sup>-2</sup>)。

**关键词:** 脉冲软 X 光; 喷射冲量; 能注量; 脉冲加速器

**中图分类号:** TN249 **文献标识码:** A

脉冲 X 光辐射材料和结构产生的热-力学效应主要由三方面的物理现象组成:喷射冲量、材料响应和结构响应。三者物理上既有区别又有联系,其中喷射冲量是受辐射材料中产生热激波传播及出现其他响应现象的根本原因,又是受辐射结构产生结构响应的初始加载条件。

上世纪 60 年代以来,国内外都特别重视研究强脉冲 X 光辐射材料和结构产生的上述物理现象<sup>[1~5]</sup>,也很重视采用脉冲电子束辐射来模拟研究上述物理现象<sup>[6~12]</sup>。上世纪 90 年代以来,国外重视起软 X 光对材料的辐射效应<sup>[13]</sup>。为进一步开拓此领域的研究,近年来我们在强光一号脉冲加速器上进行了脉冲软 X 光辐射三种材料产生喷射冲量的实验研究,并取得较满意结果。

## 1 强光一号加速器概述

强光一号装置是一台组合式多用途的高功率强流脉冲电子束加速器。主要用于产生脉冲 射线和 X 光。共有六种不同的工作状态:三种 射线状态、两种硬 X 光状态和一种软 X 光状态。图 1 为其全貌照片。本实验使用软 X 光,能量为(0.1~1.5) keV,能谱的最大值在(0.2~0.4) keV 范围内,脉宽为(40±5) ns。此状态下的加速器主要由高功率脉冲源和 Z-pinch 二极管这两大部分组成。

产生软 X 光的基本物理过程为:由高功率脉冲源产生的电流脉冲加到位于真空腔体中心的二极管阴阳极间的喷射负载上,使负载发生爆炸、气化,形成等离子体。在电流脉冲产生的磁场作用下,引起等离子体内聚箍缩,电磁能开始转换为粒子动能。当等离子体在轴线附近滞止时,被箍缩成高温高压的等离子体便辐射出软 X 光。



Fig. 1 Full view of Qiangguang-I accelerator

图 1 强光一号加速器全貌

## 2 测量原理

采用微型红外通光传感技术和直接测量特定时间间隔系列的探头原理来间接测量 X 光喷射冲量。在探头平板靶中心安有一传信杆,在传信杆自由端传感部位加工有五组实环与空环相间的结构,并在其两侧安有两组微型红外发光二极管和光电三极管。当 X 光辐射平板靶材所产生的喷射冲量反推靶-传信杆组件而向后运动时,传信杆的传感部位依次通过光束区,而形成一系列与空环和实环系相对应的通光-断光交替出现的现象,从而使探头输出电压脉冲信号系列。此探头曾在闪光二号装置上多次成功地用于电子束喷射冲量测量。为更适合于在强光一号装置上的 X 光喷射冲量测量,对原探头结构进行了适当的改进(见图 2)。

\* 收稿日期:2002-06-12; 修订日期:2002-10-09

基金项目:国防科技基础研究基金资助课题

作者简介:彭常贤(1940-),男,研究员,主要从事材料和结构的辐射热-力学效应研究;西安市 69 信箱 8 分箱。

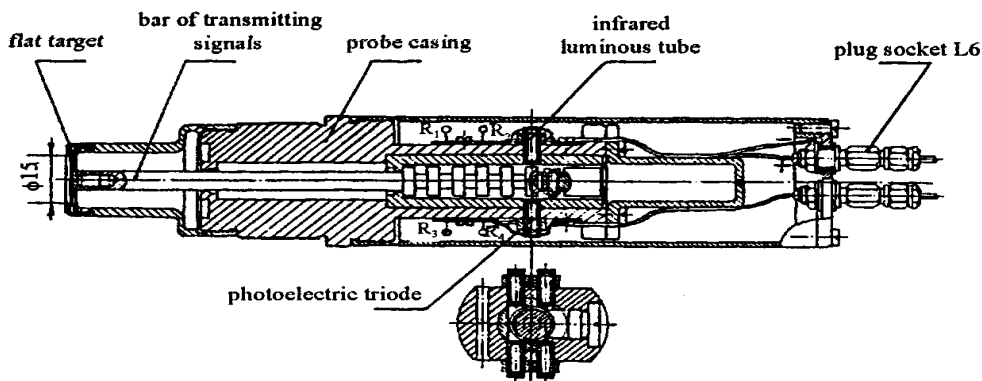


Fig. 2 X-ray blowoff impulse probe in use for Qiangguang-I

图 2 用于强光一号装置的 X 光喷射冲量探头

根据动量守恒定律,喷射冲量  $I$  为

$$I = (m_0 - m)L / [(t_n - t_p)A] \quad (1)$$

式中:  $m_0$  为探头的靶-传信杆组件的原始质量;  $m$  为靶受 X 光辐射后喷射掉的质量;  $L$  为传信杆上对应判读  $t_n$  的特征几何宽度;  $t_n$  为从实测信号波形上判读出的最小特征时间宽度;  $t_p$  为探头的两个滑动轴承对靶-传信杆组件运动时引起的摩擦力所造成的运动时间间隔的变化;  $A$  为靶受辐射面积。探头上的通光窗口直径为  $\phi 15\text{mm}$ 。由于 X 光源为与靶面平行的线源,在  $4\pi$  空间立体角上形成球面辐射,可使整个  $\phi 16\text{mm}$  靶面上都能受到辐射。故得:  $A = \pi \times 0.8\text{cm}^2 = 2.0106\text{cm}^2$ 。

式(1)可写成

$$I = (1 - m/m_0) m_0 L / [(1 - t_p/t_n) t_n A] \quad (2)$$

实验得出, X 光辐射靶材的质量亏损  $m$  一般很小。因此,  $m/m_0$  可忽略不计。

令  $p = t_p/t_n$ 。由对冲量探头的火药枪标定实验得出,平均的  $p = 2.6\%$ 。则式(2)变为

$$I = m_0 L / [(1 - p) t_n A] \quad (3)$$

若设  $t_n$  时间内探头运动组件的平均运动速度为  $v_m$ ,有

$$v_m = L / t_n \quad (4)$$

则式(3)变为

$$I = m_0 v_m / [(1 - p) A] \quad (5)$$

若靶面处的 X 光能注量  $E_\phi$  已知,则靶材的 X 光喷射冲量耦合系数 为

$$= I / E_\phi \quad (6)$$

表征单位 X 光能注量所能耦合进受辐射靶材内的冲量的大小。无疑, 愈小,材料的抗辐射性能便愈好。

### 3 实验结果及分析

采用前述冲量测量系统在强光一号装置上进行的脉冲软 X 光辐射材料的喷射冲量测量共实验了 12 炮,其中 3 炮是进行机器出束状态的物理性能鉴别实验的,而其余 9 炮是用于三种材料的 X 光喷射冲量测量的。

表 1 中列出了各炮的 X 光源有关参数。在表中,  $R$  为探头靶面至 X 光源中心的距离;  $E_{av}$  为 X 光束的平均能量;  $\tau_0$  为 X 光束波形的半高宽;  $E_t$  为 X 光总束能;  $E_\phi$  为 X 光束在靶面上的能注量。  $E_{av}$  是以各 keV 能段光子所占份额为权重而加权平均求得。  $E_\phi$  是将 X 光视为点源在  $4\pi$  空间内球面辐射并按距离平方衰减而求得,即

$$E_\phi = E_t / 4 R^2 \quad (7)$$

由表 1 可知,在此实验中:  $E_{av} = (0.20 \sim 0.33) \text{keV}$ ;  $\tau_0 = (30 \sim 53) \text{ns}$ , 9 炮的平均  $\tau_0 = 39\text{ns}$ ;  $E_t = (29 \sim 60)$

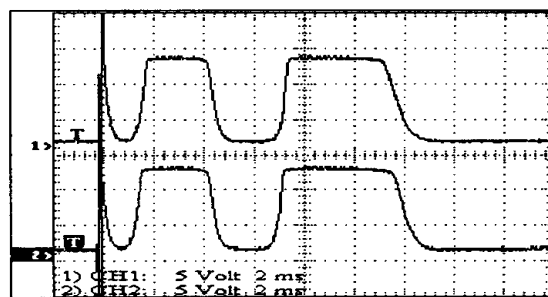


Fig. 3 Measured waveforms of the blowoff

impulse probe (01154 shot, LY-12Al)

图 3 喷射冲量探头实测波形(01154 炮, LY-12 铝)

$\text{kJ}; E_{\phi} = (92 \sim 192)\text{J}/\text{cm}^2$ 。

图 3 为典型的喷射冲量探头实测波形(01154 炮)。图中记录了脉冲 X 光辐射靶产生的喷射冲量引起靶-传信杆组件运动输出的两个正脉冲。每个探头每次可输出两个基本相同的脉冲系列。在第一个正脉冲前出现的尖窄脉冲是机器起动记录仪器的触发信号到达时引起的干扰。

表 1 X 光源参数

Table 1 Xray parameters

shots No.	R/cm	$E_{\text{av}}$ /keV	$\phi$ /ns	$E_t$ /kJ	$E_{\phi}$ /(J cm <sup>-2</sup> )
01154	5.0	0.210	53	51.2	163
01156	5.0	0.210	37	34.6	110
01157	5.0	0.318	34	41.4	132
01158	5.0	0.310	40	36.1	115
01160	5.0	0.325	30	28.9	92
01168	5.0	0.200	39	42.8	136
01169	5.0	0.271	37	50.0	159
01170	5.0	0.227	36	56.7	181
01171	5.0	0.211	44	60.2	192

表 2 中列出了 9 炮实验的有关实测数据。在表 2 中,  $J_m$  为靶受辐射后的质量亏损面密度,  $s$  为靶面的等效烧蚀厚度。有

$$J_m = m/A \tag{8}$$

$$s = m/(A \rho_0) \tag{9}$$

式(9)中:  $\rho_0$  为受辐射靶材的密度。对灰漆,  $\rho_0 = 1.90\text{g}/\text{cm}^3$ ; 对白漆,  $\rho_0 = 1.65\text{g}/\text{cm}^3$ ; 对 L Y-12 铝,  $\rho_0 = 2.79\text{g}/\text{cm}^3$ 。

表 2 X 光喷射冲量实测数据

Table 2 Data of Xray blowoff impulse measurements

shots No.	material	$m_0$ /g	$m$ /mg	$J_m$ /(mg cm <sup>-2</sup> )	$s$ /μm	$t_n$ /ms	$v_m$ /(m s <sup>-1</sup> )	$I$ /(Pa s)	$I_s$ /(Pa s J <sup>-1</sup> cm <sup>2</sup> )
01156	Grey paint	11.466	1.7	0.85	4.5	1.04	1.50	87.8	0.80
						0.96			
01160	Grey paint	11.524	1.1	0.55	2.9	1.28	1.21	71.2	0.77
						1.20			
01168	Grey paint	11.501	1.8	0.90	4.7	1.08	1.42	83.4	0.61
						1.04			
01157	White paint	11.524	2.2	1.10	6.6	0.66	2.17	127.7	0.97
						0.72			
01158	White paint	11.523	1.7	0.85	5.1	0.96	1.60	94.1	0.82
						0.92			
01169	White paint	11.511	2.0	1.00	6.0	0.96	1.56	91.7	0.58
						0.96			
01154	L Y-12Al	11.415	6.7	3.30	11.9	0.88	1.70	99.1	0.61
						0.88			
01170	L Y-12Al	11.426	7.7	3.80	13.7	0.80	2.03	118.5	0.65
						0.68			
01171	L Y-12Al	11.425	7.8	3.90	13.9	0.56	2.78	162.2	0.84
						0.52			

在表 2 中,  $t_n$  由直接判读冲量探头实测波形(见图 3)上触发信号前沿至第一个正脉冲起始点之间的时间宽度而得到的;  $v_m$  由式(4)求得(  $t_n$  取两个实测值的平均值及取  $L = 1.5\text{mm}$ );  $I$  由式(5)求得; 由式(6)求得。

分析表 1 和表 2 中的数据可知, 尽管每炮的探头靶面距 X 光源中心的距离都相同以及每炮中加到机器上

的高压也相同(40kV),但所得出的各炮能注量  $E_{\phi}$ (或总束能  $E_t$ ) 还是有一定的起伏,有时差异还较大。这主要是由于每炮的主开关和多针开关等的击穿电压不尽相同,进而引起二极管电流不尽相同所造成的,而这个过程和结果是随机的。

在表 3 中列出了三种材料的有关实测参数的范围。对每种材料,表中数据都是 3 炮实验的平均结果。

表 3 三种材料的有关实测参数范围

Table 3 Range of measured parameters for three materials

material	$J_m/(\text{mg cm}^{-2})$	$d/\mu\text{m}$	$I/(\text{Pa s})$	$E_{\phi}/(\text{J cm}^{-2})$	$I/(\text{Pa s J}^{-1} \text{cm}^2)$
Grey paint	0.55 ~ 0.90	2.9 ~ 4.7	71 ~ 88	92 ~ 136	0.61 ~ 0.80
White paint	0.85 ~ 1.10	5.1 ~ 6.6	92 ~ 128	115 ~ 159	0.58 ~ 0.97
L Y-12Al	3.30 ~ 3.90	11.9 ~ 13.9	99 ~ 162	163 ~ 192	0.61 ~ 0.84

通过对实验结果的数据处理和分析,可以看出:对相同的靶材,靶的质量亏损(及质量亏损面密度和等效烧蚀厚度)大时,测得的靶的喷射冲量也大;同时,靶上 X 光能注量也大(个别炮的结果除外)。反之亦然。这表明所得实验结果是符合 X 光辐射效应的物理规律的。在能量为(0.20 ~ 0.33) keV 范围、平均脉宽为 39ns 的脉冲软 X 光辐射下,对灰漆,在能注量为(92 ~ 136) J/cm<sup>2</sup> 时,其有效烧蚀厚度为(2.9 ~ 4.7)  $\times 10^{-3}$  mm,喷射冲量为(71 ~ 88) Pa s,冲量耦合系数为(0.61 ~ 0.80) Pa s/(J cm<sup>-2</sup>);对白漆,在能注量为(115 ~ 159) J/cm<sup>2</sup> 时,其有效烧蚀厚度为(5.1 ~ 6.6)  $\times 10^{-3}$  mm,喷射冲量为(92 ~ 128) Pa s,冲量耦合系数为(0.58 ~ 0.97) Pa s/(J cm<sup>-2</sup>);对 L Y-12 铝,在能注量为(163 ~ 192) J/cm<sup>2</sup> 时,其有效烧蚀厚度为(11.9 ~ 13.9)  $\times 10^{-3}$  mm,喷射冲量为(99 ~ 162) Pa s,冲量耦合系数为(0.61 ~ 0.84) Pa s/(J cm<sup>-2</sup>)。

#### 4 X 光源物理性能鉴别实验

上面的实验中所测得的材料喷射冲量是否都是软 X 光的贡献,其他诸如高能电子、等离子体以及源中心轴向超音速喷气等因素的影响究竟如何,这些问题必须通过对源的物理性能鉴别实验来回答。

##### 4.1 探头分别加和不加滤光片的对比实验

在源的左右两边各布一个探头,右边的探头在靶面前 6mm 处加 2 ~ 3 层 6 $\mu\text{m}$  厚二氧化碳滤光片,或加一层 100 $\mu\text{m}$  厚铝膜,而左边的探头不加,观察其实验结果的不同。

三炮实验得出:在右探头靶面前加了 2 或 3 层 6 $\mu\text{m}$  厚的二氧化碳滤光片以及仅加一层 100 $\mu\text{m}$  厚铝膜后,靶都未被烧蚀;而左探头靶面前什么都没加,结果其靶面都明显被烧蚀。这表明:(1) 实验中尽管滤光片和铝膜被烧蚀,但软 X 光已全被它吸收;(2) 伴随软 X 光出束的高能电子不能烧蚀靶,因 12 ~ 18 $\mu\text{m}$  的二氧化碳膜和 100 $\mu\text{m}$  铝膜对高能电子是透明的,这些电子都可到达靶上;(3) 等离子体对靶的烧蚀作用也是可忽略不计的;(4) 左靶的烧蚀和加载的冲量都是由软 X 光引起的。

##### 4.2 源中心拉瓦尔管的喷气实验

强光一号装置实验腔体内仍抽真空,两冲量探头分别安装在距源中心 5cm 处的左右两边。对机器不加高压,因此也没有出束,仅仅进行源中心处拉瓦尔管的喷气实验。两次实验表明,两探头的靶都一点未动。这表明 X 光出束时伴随的喷气现象不会引起安装在两侧的探头靶的运动,因此也不会对冲量测量带来影响。

#### 5 结 论

(1) 在强光一号装置上进行的软 X 光辐射材料实验所测喷射冲量基本上都是软 X 光辐射的贡献。

(2) 实验结果表明,对相同的靶材,X 光能注量大的,靶的质量亏损也大,并且靶承受的喷射冲量也大。这是符合辐射效应的物理规律的。

(3) 在能量为(0.20 ~ 0.33) keV、平均脉宽为 39ns 左右的脉冲软 X 光辐射下,对灰漆、白漆和硬铝三种材料,在能注量分别为(92 ~ 136) J/cm<sup>2</sup>、(115 ~ 159) J/cm<sup>2</sup> 和(163 ~ 192) J/cm<sup>2</sup> 时,冲量耦合系数分别为(0.61 ~ 0.80) Pa s/(J cm<sup>-2</sup>)、(0.58 ~ 0.97) Pa s/(J cm<sup>-2</sup>) 和(0.61 ~ 0.84) Pa s/(J cm<sup>-2</sup>)。

致 谢 在本实验研究中,得到了邱爱慈院士的大力支持和强光一号加速器实验室蒯斌高工等许多科研人员的通力合作,并与邱院士等进行了多次有益的讨论。在此一并表示衷心的感谢!

#### 参考文献:

[1] 彭常贤,刘晋,胡泽根,等. 强脉冲 X 光照射硬铝靶产生喷射冲量的研究[J]. 强激光与粒子束, 1998, 10(3): 383—386. (Peng C X, Liu

- J, Hu Z G, et al. Studies of the blowoff impulses in the aluminum alloy targets irradiated by intense pulsed X-ray. *High Power Laser and Particle Beams*, 1998, **10**(3):383—386)
- [2] 彭常贤, 谭红梅, 胡泽根, 等. 两端固支圆柱壳在脉冲 X 光辐射下的动力学响应[J]. 高压物理学报, 1999, **13**(s1):373—375. (Peng C X, Tan H M, Hu Z G, et al. The dynamic response of the built-in cylindrical shell irradiated by pulsed X-ray. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 1999, **13**(s1):373—375)
- [3] Starkovich V S, Todd B E, Stephani E L, et al. Probe velocity transducer[R]. LA-4999-MS, 1972.
- [4] Barker L M, Hollenback R E. Laser interferometer in the underground nuclear test environment[R]. SC-RR-710444, 1971.
- [5] Read R P. The sandia field test quartz gage, its characteristics and data reduction[R]. SC-DC-714529, 1972.
- [6] 彭常贤. 电子束辐照硬铝产生热激波的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 1987, **7**(3):250—256. (Peng C X. Experimental studies of the thermal shock wave produced in aluminum alloy bombarded by electron beam. *Explosion and Shock Waves*, 1987, **7**(3):250—256)
- [7] 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. (Peng C X, Tan H M, Hu Z G, et al. Experimental studies of blowoff impulses induced by electron beam with different materials and different energy fluxes. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 1999, **13**(1):15—21)
- [8] 彭常贤, 谭红梅, 胡泽根, 等. 三种壳体在脉冲电子束辐射下动力学响应的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2001, **21**(1):21—25. (Peng C X, Tan H M, Hu Z G, et al. Dynamic responses of shells irradiated by pulse electron beams. *Explosion and Shock Waves*, 2001, **21**(1):21—25)
- [9] 彭常贤, 林 鹏, 谭红梅, 等. 三维编织复合材料的热激波传播衰减特性[J]. 材料科学与工程, 2002, **20**(2):187—191. (Peng C X, Lin P, Tan H M, et al. Experimental studies of propagation and attenuation behavior of thermal shock wave in 3-D braided composites radiated by pulsed electron beam with high energy fluences. *Materials Science and Engineering*, 2002, **20**(2):187—191)
- [10] 张广兴. 脉冲载荷下柱壳结构响应实验研究[J]. 导弹与航天运载技术, 1995, **1**(3):16—25. (Zhang G X. Experimental studies of structural response of cylindrical shells under impulsive loading. *Missile and Aerospace Delivery Technology*, 1995, **1**(3):16—25)
- [11] Oswald R B Jr, Mclean F B, Schallhorn D R, et al. Dynamic response of aluminum to pulsed energy deposition in the melt - dominated regime[J]. *J Appl Phys*, 1973, **44**(8):3563—3574.
- [12] Peugnet C, Roche M. Experimental and theoretical study of the equation of state of carbon using intense beam of relativistic electrons[J]. *J Appl Phys*, 1980, **51**(8):4169—4177.
- [13] Johnson D E, Lee L M, Hedemann M A, et al. PVDF measurement of soft X-ray induced shock and filter debris impulse[J]. *American Institute of Physics*, 1994. 1911—1914.

## Experimental studies of blowoff impulse in materials irradiated by pulsed soft X-ray

PENG Chang-xian<sup>1</sup>, TAN Hong-mei<sup>1</sup>, LIN Peng<sup>1</sup>, LI Hong-jie<sup>2</sup>, MENG Gang<sup>2</sup>

(1. Northwest Institute of Nuclear Technology, P. O. Box 69-8, Xi an 710613, China;

2. Beijing Institute of Mechanical & Electrical Technology, Beijing 100076, China)

**Abstract:** The blowoff impulse of three different materials irradiated by soft X-ray was studied on Qiangguang-I pulsed accelerator. The experimental results show that the coupling coefficients of blowoff impulse for grey paint, white paint and aluminum alloy irradiated by X-ray, the energy of which was in the range from 0.20keV to 0.33keV and the average pulse width of which was 39ns, were in the range from 0.61Pa·s/(J·cm<sup>-2</sup>) to 0.80 Pa·s/(J·cm<sup>-2</sup>), from 0.58 Pa·s/(J·cm<sup>-2</sup>) to 0.97 Pa·s/(J·cm<sup>-2</sup>) and from 0.61 Pa·s/(J·cm<sup>-2</sup>) to 0.84 Pa·s/(J·cm<sup>-2</sup>), respectively, when X-ray energy flux was in the range from 92J/cm<sup>2</sup> to 136J/cm<sup>2</sup>, from 115J/cm<sup>2</sup> to 159J/cm<sup>2</sup> and from 163J/cm<sup>2</sup> to 192J/cm<sup>2</sup>, respectively.

**Key words:** Pulsed soft X-ray; Blowoff impulse; Energy flux; Pulsed accelerator