文章编号：1000-5773(2005)01-0080-06

采用靶摆式探头测量软 X 射线辐射材料产生的喷射冲量*

彭常贤[1]，谭红梅[1]，林 鹏[1]，李宏杰[2]，孟 刚[2]

(1. 西北核技术研究所，陕西西安 710024；
2. 北京机电研究所，北京 100076)

摘要：采用靶摆旋转运动式冲量探头，在“强光一号”加速器上，测量了脉冲软 X 射线辐射材料产生的喷射冲量。实验结果表明，在平均能量为 0.21 keV、平均半高宽为 36 ns 和平均能注量为 143 J/cm^2 的软 X 射线辐射下，测得一种复合材料的喷射冲量耦合系数为 0.70 Pa·s/(J·cm^{-2})。

关键词：脉冲软 X 射线；脉冲加速器；喷射冲量；能注量；靶摆
中图分类号：O347.3 **文献标识码**：A

1 引 言

当脉冲 X 射线、电子束和激光等高能粒子束作用于材料和结构时，往往会产生辐射热-力学效应(如喷射冲量、材料响应和结构响应等)。在常规情况下，各种相关的高功率脉冲加速器是开展上述物理现象研究的重要手段。在辐射热-力学效应研究中，喷射冲量的测量非常重要。一般采用的测量方法有三种：(1) 靶杆直线运动式[1~5]；(2) 靶摆旋转运动式[6]；(3) 靶悬梁弯曲运动式[7]。本文报道采用靶摆旋转运动式冲量探头测量脉冲软 X 射线辐射材料产生喷射冲量的研究。

研究材料和结构的脉冲辐射热-力学效应，对于国防事业和国民经济的某些领域中，更全面地评价有关材料和结构的抗辐射性能，以及如何改进它们的研发都具有重要意义。

2 测量原理

采用由差动变压器式角位移传感器和固定在该传感器转轴上的靶组件复摆系统所组成的旋转运动式冲量探头，测量软 X 射线喷射冲量(见图 1)。当靶面遭受软 X 射线辐射时，由于靶材物质的熔化、汽化而出现物质喷射现象，一个反冲的喷射冲量使靶摆与角位移传感器转轴一起偏离原静止铅垂位置，而向侧面转动。探头直接测量的量为靶摆的最大转角，它可由判读实验中实测到的角位移传感器输出的电压波形峰值、再经已知的标定曲线而求得。而喷射冲量则由与最大转角等参数有关的表达式而换算得出。

由图 1 可知，靶摆系统的运动部分主要由转轴、摆杆和靶组件等组成。设：X 射线在辐射靶板后，使得靶摆向右偏转 θ 角，靶心至转轴的距离(即摆长)为 l，靶摆系统的质心为 C，质心至转轴的距离为 b，靶摆偏转 θ 角度后，其质心升高至 B 点。若过 B 点作过 C 点的水平线 CA 的垂线 BA，则 BA 即为质心 C 对应的升高高度，记为 h。在等腰三角形 OCB 中，有 $\angle OCB=(180^\circ-\theta)/2=90^\circ-\theta/2$，$CB=2b\sin(\theta/2)$。在直角三角形 CBA 中，有 $\angle BCA=90^\circ-\angle OCB=\theta/2$，$BA=CB\sin(\theta/2)$。可得：$BA=2b\sin^2(\theta/2)=b(1-\cos\theta)$。即有 $h=b(1-\cos\theta)$。设靶摆首次偏离静止铅垂位置，而转至最大转角 θ_m 时的最大质心升高高度为 h_m，显然有

$$h_m=b(1-\cos\theta_m) \tag{1}$$

由于软 X 射线辐射靶板的时间极为短暂(几十纳秒)，产生的喷射冲量作用靶摆的时间也很短暂，

* **收稿日期**：2004-02-18；**修回日期**：2004-05-09
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.

可认为在这个时间内,靶摆系统在喷射冲量作用下只获得了角速度 ω,并未发生角位移,即系统仍处于原始平衡状态,重力仍通过转轴中心(图 1 中 O 点),也即可认为重力对其转轴中心的力矩为零;此外,由于角位移传感器的转轴光滑以及它与轴孔之间的动配合良好,此处的摩擦力矩也可忽略不计。可根据上述情况对靶摆系统运用角动量守恒定律和能量守恒定律。由系统的角动量守恒有

$$m_e v l = J\omega \tag{2}$$

式中:左边项 $m_e v l$ 为过程开始时,靶面喷射物质反冲力在靶摆系统的靶心处对转轴 O 的角动量;右边项 $J\omega$ 为过程末了时,反冲力对转轴 O 的角动量。v 为喷射反冲引起的靶心处的运动速度;m_e 为相对于速度 v 的靶心处的等效质量;J 为靶摆系统对于转轴 O 的转动惯量;ω 为靶摆系统绕 O 点的转动角速度。

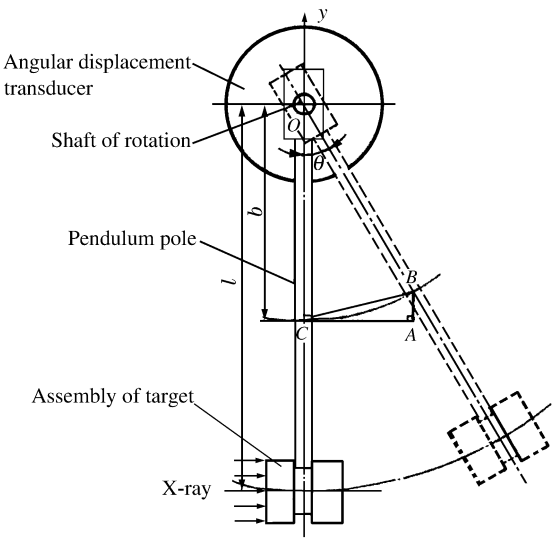


图 1　靶摆旋转运动式冲量探头原理图

Fig. 1　Schematic diagram of impulse equipment in which target-pendulum moves in the rotational way

若忽略空气对靶摆运动的阻力("强光一号"实验腔体内抽真空至 0.2～0.4 mPa),由系统的机械能守恒有

$$\frac{1}{2}J\omega^2 = mgh_m \tag{3}$$

式中:左边项为靶摆系统作定轴转动的动能;右边项为靶摆系统作定轴转动后所具有的最大势能;m 为靶摆系统的总质量;g 为重力加速度。前面已指出,整个喷射冲量的作用时间是很短暂的,可认为在靶摆工作的初始阶段,其靶心处的速度 v 是不变的。由靶心运动的动量守恒有

$$IA = m_e v \tag{4}$$

式中:左边项为靶面所受的总冲量;右边项为靶心处的动量。I 为所要求得的喷射冲量(单位为 Pa·s,有的文献也称为比冲量);A 为靶件的受辐射面积。联立(1)式～(4)式,可得

$$I = [2gmbJ(1-\cos\theta_m)]^{1/2}/lA \tag{5}$$

由(5)式可知,当靶摆系统的几何和物理参数给定后,喷射冲量 I 仅与靶摆的最大转角 θ_m 有关,而 θ_m 可由角位移传感器直接测量出。但参数 m、b 和 J 与靶摆系统的结构、材料和几何尺寸密切相关,需要根据具体情况详细计算或实验测定。若靶面处的 X 射线能注量已知,则靶材的 X 射线喷射冲量耦合系数 β 为

$$\beta = I/E_\varphi \tag{6}$$

β 表征单位 X 射线能注量所能耦合进受辐射靶材内的冲量的大小。无疑,β 愈小,表明材料的抗辐射性能愈好。

3　靶摆系统的有关物理参数计算

靶摆系统的转动惯量 J、质心距 b、总质量 m 和固有摆动周期 T_0 等均由计算得出,这样既简便又可靠。

3.1　转动惯量计算

根据系统转动惯量的线性叠加原理,有

$$J = \sum_i J_i = J_1 + J_2 + J_3 \tag{7}$$

式中:J_1 为角位移传感器转轴(不含摆杆内的那一段)相对于转动中心的转动惯量;J_2 为摆杆(含与之连接的转轴的一段)相对于转动中心的转动惯量;J_3 为靶组件相对于转动中心的转动惯量(见图 1)。

在具体的计算中,必须已知靶摆各部分的几何形状、材料和几何尺寸。传感器转轴由两个圆柱体组成,材料为 1Cr18Ni9Ti。靶杆由连轴端、杆体和连靶端组成,其形状分别为圆柱体、细圆棒和长方体,材

料为 1Cr18Ni9Ti。靶组件由靶件、安靶座和配重块组成,形状都是圆柱体。靶件又由复合材料和硬铝组成,靶托又有圆片和带螺杆圆片两种。安靶座和配重块的材料为 H62 铜。

根据靶摆结构的具体情况,需计算下列转动惯量[8~9]:(1) 绕其轴线转动的圆柱体的转动惯量;(2) 绕通过其质心并垂直于其轴线的转轴的圆柱体的转动惯量;(3) 绕通过其质心并垂直于其轴线的转轴的细圆棒的转动惯量;(4) 绕通过其质心并垂直于其长×厚平面的转轴的长方体的转动惯量;(5) 绕与其质心轴平行的转轴的刚体的转动惯量。

对于两种靶型情况,计算出的靶摆三部分转动惯量 J_1、J_2、J_3 和对应的质量 m_1、m_2、m_3 以及总质量 m 和总转动惯量 J 的结果列于表 1 中。

表 1 靶摆有关物理参数表

Table 1 Physical parameters of target pendulum

Target type	m_1 /(g)	m_2 /(g)	m_3 /(g)	J_1 /(g·cm^2)	J_2 /(g·cm^2)	J_3 /(g·cm^2)	m /(g)	J /(g·cm^2)	b /(cm)	T_0 /(ms)
Disk with screw	16.22	25.95	31.06	1.16	773.46	3118.70	73.24	3893.32	5.57	620
Disk	16.22	25.95	29.58	1.16	773.46	2968.92	71.75	3743.54	5.48	619

3.2 质心距计算

取靶摆质心系的 x 坐标轴为靶摆转轴的中心线,y 坐标轴为摆杆的中心线(见图 1)。则坐标原点 O 为转轴中心线与摆杆中心线的交点,而 z 坐标轴通过 O 点,并与 xy 平面垂直。设靶摆质心系的质心 C 相对于坐标原点 O 的坐标为(x_C,y_C,z_C),根据质心定理和靶摆系坐标的具体情况,有

$$\begin{cases} x_C = 0 \\ y_C = \sum_i M_i y_i \Big/ \sum_i m_i = \sum_i M_i y_i \Big/ m \\ z_C = 0 \end{cases} \tag{8}$$

式中:m 为靶摆系统的总质量;M_i 为靶摆的各部件质量;y_i 为各部件质心至坐标原点 O 的距离;$i=1,2,3,\cdots,i$。显然,(8)式中的 y_C 即(5)式中的 b。计算出的 b 值也列出在表 1 中。

3.3 固有摆动周期计算

复摆的固有摆动周期 T_0 可按下式计算

$$T_0 = 2\pi(J/mgb)^{1/2} \tag{9}$$

计算得出,对使用带螺杆圆片靶情况,$T_0=620$ ms;对使用圆片靶情况,$T_0=619$ ms。

4 测量系统的标定和运动波形演示

4.1 动态标定

差动变压器式角位移传感器直接输出的是载波调幅信号(载频为 3 kHz),经前置电路检波后传输到示波器上的是直流电压信号。要建立传感器最大转角 θ_m 与输出电压峰值 U_m 的关系,必须进行专门的标定实验。采用 OMRON-E6B2 光电旋转编码器对传感器进行动态标定,所用编码器每转可输出 1 000个脉冲,所以角度测量精度是很高的;而标定时所用靶摆系统与正式实验时用的完全相同,所以有的影响可以消除。因此总的标定精度是相当高的。实验中对靶摆的动态加载是通过手持锤物快速横向敲击靶面而实现的。经对动态标定数据进行最小二乘法拟合所得的定量表达式为

$$\theta_m = 16.600U_m + 0.142U_m^2 \tag{10}$$

4.2 运动波形演示

图 2 中给出了靶摆系统的运动演示波形。此模拟实验的加载方法是,手持锤物突然水平敲击处于静止铅垂位置的靶面。图 2 中的波形是在靶摆只可向右自由旋转的条件下得到的,因此基线下部没有波形。观察靶摆系统的人工运动演示波形,对于认识和分析 X 射线辐射下的实测波形具有重要的参考价值。

5　实验结果及分析

实验中采用一炮一靶方案。图 3 为安装在加速器真空腔体中的靶摆旋转运动式冲量测量装置。安装时,应注意使靶摆系统自然铅垂向下并活动自如,然后调整前置电路的零点旋纽,使传感器输出处于零基线状态。

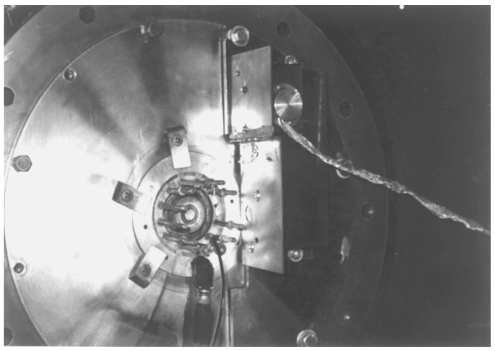


图 3　安装在加速器真空腔体中的靶摆旋转运动式冲量测量装置

Fig. 3　Impulse measurement system installed in vacuum cavity of accelerator, in which target-pendulum moves in the rotational way

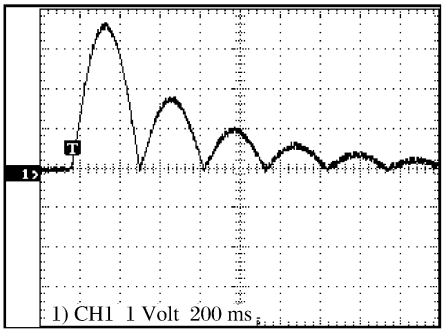


图 2　靶摆系统运动演示波形

Fig. 2　Waveform demonstrating the movement of target-pendulum system

5.1　X 射线有关源参数

“强光一号”实验室通过直接测量法可向用户提供每炮的 X 射线时间谱(见图 4),并同时采取吸收法(直接测量 5 个能点),还可向用户提供每炮的能谱(见图 5)。根据上述原始诊断资料经再处理,可得出如表 2 所列的各炮的 X 射线有关源参数。在表 2 中,E_{av}为 X 射线的平均能量;τ_0 为 X 射线波形的半高宽;E_t 为 X 射线的总束能;R 为靶受辐射面至 X 射线源中心的距离;E_φ 为 X 射线在靶面上的能注量。E_{av}是以各千电子伏能段光子所占份额权重而加权平均求得。E_φ 是将 X 射线视为点源在 4π 空间内球面辐射并按距离平方(即 R^2)衰减而求得。即

$$E_\varphi = E_t / 4\pi R^2 \tag{11}$$

表 2　X 射线源参数

Table 2　X-ray parameters

Shot No.	E_{av} /(keV)	τ_0 /(ns)	E_t /(kJ)	R /(cm)	E_φ /(J·cm^{-2})
03229	0.205	36	46	5.0	146
03230	0.216	34	51	5.0	162
03232	0.214	37	55	6.0	122

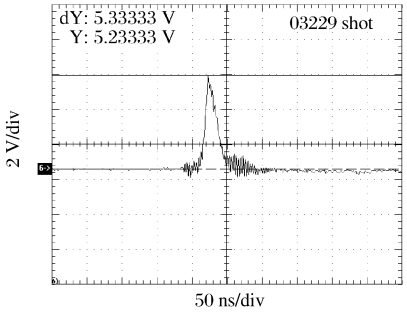


图 4　X 射线时间谱

Fig. 4　X-ray time spectrum

5.2　喷射冲量测量结果及分析

5.2.1　*波形分析*

图 6 给出了在脉冲软 X 射线辐射下,靶摆旋转运动式喷射冲量探头的典型实测波形。根据测量系统、探头安装装置和加速器运行等实际情况,对实测波形的分析和说明如下:

(1) 图 6 中的实测波形与图 2 中的演示波形是很类似的。只是在图 6 的波形中叠加有高频干扰和频率低一些的机械振动干扰,远没有图 2 的波形光滑和“干净”。但两图反映出的靶摆系统的运动规律是一致的。

(2) 实测中为了使整个靶面尽可能受到均匀的 X 射线辐射,在靶摆系统安装时,使靶面尽量靠近防护板上辐射窗口处(见图 2 中位于 X 射线源回流柱圈的右侧、并对准中心的辐射窗口内的靶面),留下的间隙为 0.5～1.5 mm。因此靶摆在返回时,过中心铅垂位置向左只能旋转很小的角度(最大在 0.9°左右),这样实测波形只有靶摆右侧运动的波形(对应于图 6 中只有基线以上的波形),而左侧运动的波形(也即图 6 中基线以下)很小或没有。

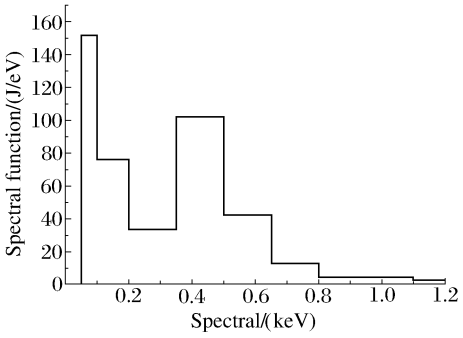


图 5 X 射线能谱图(03229 炮)

Fig. 5 X-ray energy spectrum (03229 shot)

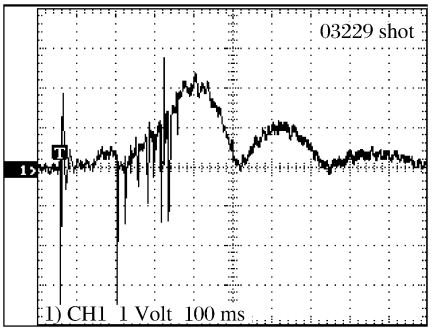


图 6 靶摆旋转运动式喷射冲量探头实测波形

Fig. 6 Measured waveforms of blowoff impulse equipment in which target-pendulum moves in the rotational way

(3) 在第 1 个正波形中,从基线上升至顶峰的一段,对应的是靶摆首次向右旋转至最大转角 θ_m 处;随后波形从顶峰下降至基线的一段,对应的是靶摆返回向左旋转至原中心铅垂位置;再随后靶摆继续向左运动,并很快与防护板窗口处内壁发生首次高速碰撞,而使能量严重损失。因此基线以上的第 1 个波形是在靶摆首次碰撞前记录的,是没有受到碰撞能量损失影响的。所以,第 1 个正波形的变化历史严格地反映出靶摆受 X 射线辐射产生反冲喷射冲量而引起的首次向右和向左返回旋转运动的物理过程。判读该波形的峰值即为要实测的电压幅度 U_m(见表 3)。

表 3 X 射线喷射冲量实测数据

Table 3 Data of X-ray blowoff impulse measurements

Shot No.	Material	Target type	U_m /(V)	θ_m /(°)	A /(cm)	I /(Pa·s)	E_φ /(J·cm^{-2})	β /[Pa·s/(J·cm^{-2})]
03229	Composite	Disk	2.00	33.77	1.926	114.6	146	0.78
03230	Composite	Disk with screw	1.93	32.57	1.936	114.3	162	0.71
03232	Composite	Disk	1.31	21.99	1.924	75.3	122	0.62

(4) 由于靶摆每次向左旋转时都要碰撞一次防护板内壁,而显著损耗能量,所以在第 1 个波形后的诸波形的幅度都迅速减小(比靶摆可左右自由旋转时的波形幅度要小得多)。并且由于实验时加速器的强烈机械振动,在实测波形上叠加有探头实验装置的机械振动波形。

(5) 从波形上的触发"T"时刻(可近似认为是 X 射线的出束时刻)至第 1 个正波的起点为 170 ms 左右,也即从出束到靶摆开始旋转需要 170 ms 的时间,这反映了靶摆系统的惯性。此外,从 03229 炮、03230 炮和 03232 炮的实测波形上得出的靶摆固有摆动周期 T_0 的实测值分别为 590 ms、600 ms 和 636 ms,与表 1 中 T_0 的计算值基本一致。

5.2.2 *数据分析*

在表 3 中列出了 3 炮实验的实测数据。表中的 U_m 由直接判读每炮的冲量探头实测波形(见图 6)上的第 1 个波形的峰值而得到;θ_m 由(10)式求得;靶的公称受辐射面积 $A=\pi d^2/4=2.011$ cm^2,但实验中存在靶面一边稍有被源的回流柱遮挡现象,需进行修正,实际 A 值略小于公称值;I 由(5)式求得;β 由(6)式求得。

由(6)式可知,β 的测量精度由 I 和 E_φ 两参数的测量精度确定。而由于在现场实验中 E_φ 值测量的难度很大,"强光一号"加速器实验室提供的 E_φ 的测量精度远没有 I 的测量精度好,因此 β 的测量精度主要由 E_φ 的测量精度决定,而 I 的测量精度已不是主要的。

分析表 2 和表 3 中的数据,可得出下列看法:当对 3 炮的 X 射线能量、半高宽、能注量和喷射冲量耦合系数取平均值时,所得的结果是,在平均能量为 0.21 keV、平均半高宽为 36 ns 和平均能注量为 143 J/cm^2 的脉冲软 X 射线辐射下,一种复合材料的平均喷射冲量耦合系数为 0.70 Pa·s/(J·cm^{-2})。

6 结　论

(1) 靶摆旋转运动式冲量测量系统用于"强光一号"加速器恶劣环境下的实验研究是成功的。

(2) 在平均能量为 0.21 keV、平均半高宽为 36 ns 和平均能注量为 143 J/cm^2 的脉冲软 X 射线辐射下,测得一种复合材料的喷射冲量耦合系数为 0.70 Pa·s/(J·cm^{-2})。

感谢"强光一号"加速器实验室的大力支持和通力合作。

References:

[1] Starkovich V S, Todd B E, Stephani E L, et al. Probe Velocity Transducer [R]. LA-4999-MS, 1972.

[2] Peng C X, Tan H M, Hu Z G, et al. Variation of the Coupling Coefficients of Blowoff Impulse Versus Energy Flux in LY-12 Aluminum Alloy Targets Bombarded by Electron Beam [J]. Explosion and Shock Waves, 1997, 17(2): 127－135. (in Chinese)
彭常贤,谭红梅,胡泽根,等. 受电子束辐照的硬铝靶的喷射冲量耦合系数随能通量的变化规律 [J]. 爆炸与冲击, 1997, 17(2): 127－135.

[3] 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 [J]. High Power Laser and Particle Beams, 1998, 10(3): 383－386. (in Chinese)
彭常贤,刘　晋,胡泽根,等. 强脉冲 X 光辐照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.

[4] 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 [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.

[5] Peng C X, Tan H M, Lin P, et al. Experimental Studies of Blowoff Impulse in Materials Irradiated by Pulsed Soft X-Ray [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2003, 15(1): 89－93. (in Chinese)
彭常贤,谭红梅,林　鹏,等. 脉冲软 X 光辐射三种材料的喷射冲量实验研究 [J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(1): 89－93.

[6] Oswald R B Jr, Mcleam 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.

[7] Comfort W J. VTAB: A Passive Impulse Gage [R]. UCRL-73568, 1971.

[8] Liang S R, Liu C N, Sheng Z H. General Physics, Book One, Mechanics [M]. Beijing: Higher Education Press, 1987. (in Chinese)
梁绍荣,刘昌年,盛正华. 普通物理学(第一分册):力学 [M]. 北京:高等教育出版社, 1987.

[9] Zhao J Y, Wang S X. Mechanics [M]. Beijing: Higher Education Press, 1984. (in Chinese)
赵景员,王淑贤. 力学 [M]. 北京:高等教育出版社, 1984.

Measurement of Blowoff Impulse in Materials Radiated by Pulsed Soft X-Ray with a Pendulum Target System

PENG Chang-Xian[1], TAN Hong-Mei[1], LIN Peng[1],
LI Hong-Jie[2], MENG Gang[2]

(1. *Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an* 710024, *China*;
2. *Beijing Institute of Mechanical & Electrical Technology, Beijing* 100076, *China*)

Abstract: The blowoff impulse in materials radiated by the pulsed soft X-ray on Qiangguang-Ⅰ accelerater was measured by using an impulse equipment in which the target-pendulum moves in the rotational way. For a composite radiated at average energy of 0.21 keV, pulse width of 36 ns, and fluence of 143 J/cm^2, the coupling coefficient of the blowoff impulse was measured as about 0.70 Pa·s/(J·cm^{-2}).

Key words: pulsed soft X-ray; pulsed accelerator; blowoff impulse; fluence; target-pendulum