

文章编号: 1001-4322(2005)04-0599-04

# 强流脉冲电子束轰击下回喷靶材速度 测量与数值模拟\*

朱 隽, 章林文, 龙继东, 李 劲, 禹海军, 尚长水, 李 剑

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** 叙述了用高速摄影技术研究强流脉冲电子束与钽金属靶相互作用后靶材的回喷现象, 得出了靶材回喷的速度。并且采用 EGS4 程序和 Euler 流体力学方程组分别模拟了电子束在靶内的能量沉积和束靶相互作用的动力学过程。实验表明, 钽金属靶在强流脉冲电子束轰击下, 回喷靶材的轴向速度大于  $2.9 \text{ mm}/\mu\text{s}$ , 而模拟结果表明理想情况下回喷靶材自由面的轴向速度可达  $9.7 \text{ mm}/\mu\text{s}$ 。实验和理论计算为阻挡回喷靶材的快门设计提供了必要的参数。

**关键词:** 强流脉冲电子束; 束靶相互作用; 回喷; 高速摄影

**中图分类号:** TL503.92 **文献标识码:** A

强流脉冲电子束经过加速和聚焦后, 轰击钽金属靶产生的回喷靶材颗粒吸附在加速器的绝缘支撑上, 造成了局部高场强, 引起加速组元电击穿。为了有效地抑制电击穿现象, 必须对回喷靶材进行阻挡。采用快门阻挡可能是一种可行的方法, 而对快门动作速度的要求应由回喷靶材的速度决定。

电子束辐照效应主要包括热效应和力学效应, 热效应包括材料的温升、相变等, 而力学效应则主要指热激波的产生、发展、结构响应以及它们所引起的材料的变形、破坏和性质的改变。近年来一些文献报道了电子束与靶相互作用方面的研究成果<sup>[1~4]</sup>。美国学者对能量 20 MeV、电流 2.3 kA、脉冲宽度 60 ns 的电子束轰击钽泡沫靶的动力学过程进行了模拟<sup>[1]</sup>, 结果表明, 电子束在靶中的能量沉积能够迅速将靶材加热到几 eV, 造成靶材的气化电离。在  $0.65 \mu\text{s}$  时高速喷出的气化电离靶材前沿的轴向速度可达  $1.2 \text{ cm}/\mu\text{s}$ 。在 DARHTII 4 脉冲加速器的设计中, 高速回喷的气化电离靶材还将带来另一个问题, 当后续电子束脉冲与其前面的脉冲产生的气化电离靶材作用时, 可能造成后续脉冲的不稳定和焦斑的扩大<sup>[5,6]</sup>。

高速摄影技术被广泛应用于爆轰、等离子体和束靶相互作用等高速过程的拍摄<sup>[7,8]</sup>, 本文实验中使用 FJZ250 超高速转镜相机分别从平行于靶面和与靶面成  $55^\circ$  两个方向对回喷过程进行了拍摄, 获得了清晰的照片, 并且通过照片对回喷靶材的速度进行了估算。通过蒙特-卡洛(M-C)方法模拟得到了电子束在靶内的能量沉积分布, 然后以 Euler 坐标系中的可压缩理想流体力学方程组作为喷射靶材的数学模型, 使用有限差分法在柱对称坐标系中求解, 得到了与实验较为一致的结果。

## 1 实验装置设计

FJZ250 超高速转镜相机的拍摄频率为  $5 \times 10^5$  幅/s, 每幅图像曝光时间为  $2 \mu\text{s}$ , 尺寸为  $15 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ , 当物体处于焦点处时放大倍数为 4.2。实验中发现回喷靶材的亮度足以使拍摄时使用的 100 度黑白胶卷感光, 所以没有引入外加光源。该胶卷一次拍摄可以得到 40 幅图像。相机分别从平行于靶面以及与靶面约  $55^\circ$  的方向进行拍摄, 其光轴和加速腔轴线在同一水平面上, 如图 1 所示。

在拍摄时序上要保证电子束打靶瞬间所成的像大约在胶卷的前  $1/3$  处。由于相机快门的打开时间在  $1 \text{ s}$  左右, 而电子束打靶后在靶上形成的洞的部分轮廓持续处于高温状态, 相机转镜每旋转一周 ( $1 \text{ ms}$ ) 都会使胶卷再次处于拍摄状态, 从而产生重复曝光, 导致了孔的轮廓被叠加在底片上每一幅图像中。为了消除重复曝光的影响, 爆炸快门被用来及时阻断相机的光路。

考虑到采用厚靶的情况下靶材喷射可能对机器带来损害, 实验中仅使用了 3 层的叠靶, 单层靶厚  $0.05 \text{ mm}$ , 层间隔  $0.2 \text{ mm}$ 。

\* 收稿日期: 2004-10-19; 修订日期: 2005-01-19

基金项目: 国防科技基础研究基金资助课题

作者简介: 朱 隽 (1981—), 男, 硕士研究生, 核技术与应用专业; 绵阳 919-106 信箱; E-mail: wawa\_junz@sina.com。

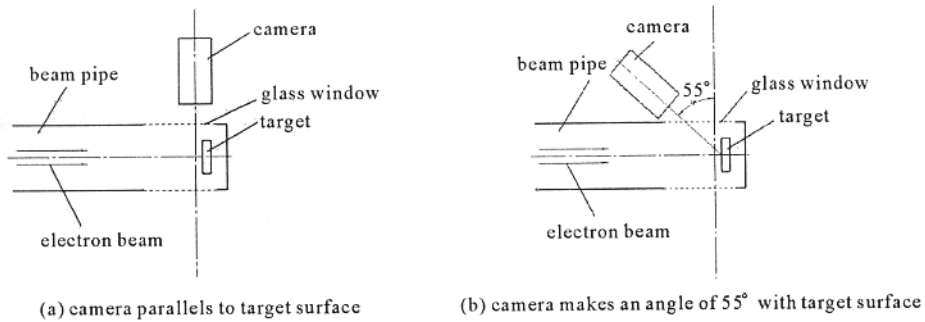


Fig. 1 Layout of fast photography

图 1 高速相机光路布置图

## 2 实验结果及分析

图 2 为拍摄得到的靶材回喷的照片,按照时间顺序对每张照片中的图像进行编号,其中编号 1 均为电子束打靶后拍摄到的第 1 幅图像。在图 2(c)和(d)中的第 1 幅图像看到的轮廓为靶上洞的轮廓的重复曝光所造成的,这对回喷靶材速度的估算不会造成影响。依据公式  $v=L/t$  可以估算出在  $t$  时间内回喷靶材前沿的轴向平均速度,其中  $L$  为两幅图像之间回喷靶材前沿运动的距离, $t$  为两幅图像的时间间隔。由于不能准确判断图像中回喷靶材的前沿,所以估算中只取图中较亮的部分。在图 2(a)中,第 1,2 幅图像之间回喷靶材前沿的轴向移动距离约为 7.5 mm,时间为  $2 \mu\text{s}$ ,放大倍数约为 4.2,那么可以估算出  $v \approx 0.9 \text{ mm}/\mu\text{s}$ 。

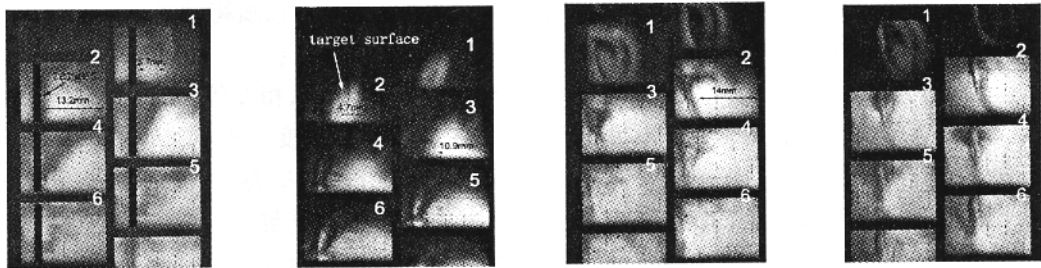


Fig. 2 Image of the back ejecta target

图 2 靶材回喷过程的照片

由于每发实验的电子束焦斑有所变化,将相机光路与靶平面成约  $55^\circ$  进行拍摄,既能观察到靶材的回喷,也能观察到电子束打靶瞬间焦斑的大小。因为底片上得到的图像是实际图像的投影,所以计算移动距离时采用公式  $L=L_0/\cos 55^\circ$ ,其中  $L_0$  为从底片上测量得到的距离。图 2(b)、(c)和(d)的第 1 幅图像都表现为小亮斑,没有回喷现象,可以认为此时的运动距离为 0。由图 2(b)的第 1 幅和第 2 幅图像可以估算出  $v \approx 0.98 \text{ mm}/\mu\text{s}$ ,由第 2,3 幅图像得到的速度为  $1.29 \text{ mm}/\mu\text{s}$ ,因此可以认为在喷射初期回喷靶材前沿的轴向速度变化不大。图 2(c)中回喷靶材前沿在轴向已经超出了图像的边界,可以估算出  $v > 2.9 \text{ mm}/\mu\text{s}$ 。图 2(d)则显示出了更大的喷射速度,回喷靶材在径向已经超出了孔的边缘。

由上述结果可以看出,从每发实验中得到的回喷靶材速度的估算值存在较大差异,其原因主要在于电子束在靶上的能量沉积密度(单位质量的能量沉积)。可以看出图 2(c)和(d)第 1 幅图像中的亮斑明显小于图 2(b)中的,亮斑越小,表明电子束的焦斑越小,其能量沉积密度也就越大,回喷靶材的速度也就越快。所以,在电子束流状况良好的情况下,回喷靶材的速度将大于  $2.9 \text{ mm}/\mu\text{s}$ 。

从照片中可以看出,回喷靶材主要为气雾状的喷射物,并没有拍摄到较大的颗粒喷射物。大颗粒喷射物可能来自于早期使用的 1 mm 厚实心靶。1 mm 厚实心靶和叠靶的动力学行为存在较大的差异,在电子束辐照 1 mm 厚实心靶时由靶内热激波发展而形成的前表面层裂可能是产生大颗粒喷射物的机制之一。

## 3 数值模拟

### 3.1 电子束在靶内的能量沉积模拟

在模拟中假设入射电子束的能散和发射度为 0。实际测得束流的发射度在  $2\,000 \sim 3\,000 \text{ mm} \cdot \text{mrad}$  之间,能散度小于 1%,所以假设和实际情况非常接近。在电子束作用时间内钽金属靶将气化膨胀,但是考虑到

电子束的作用时间只有几十 ns, 膨胀十分有限, 所以在 M-C 模拟中假设靶的形状和密度在电子束作用期间是不变的。

参照文献[3]中的方法, 利用 M-C 程序 EGS4 模拟得到的能量沉积结果如图 3 所示。根据模拟得到的电子束在每层钽靶内的能量沉积, 并假设电子束的面密度沿径向的分布为高斯分布, 就可以通过插值计算出不同厚度、不同半径处电子束在靶内的能量沉积密度。

### 3.2 靶材喷射动力学模拟

由上述 M-C 模拟的结果可以得出, 焦斑范围内的靶材几乎全部被气化, 甚至电离。把气化喷射靶材看作为可压缩、无粘性、无热传导的理想气体, 未被气化的靶材当作固壁处理, 利用二维柱对称 Euler 坐标系中的理想流体力学方程组对其动力学过程进行数值模拟, 流体力学方程组以及相应的差分方程的格式见文献[9]。状态方程则采用理想气体的状态方程

$$p = (\gamma - 1)\rho(e - E_s) \tag{1}$$

式中:  $\rho, e, p$  分别表示密度、比内能和压力;  $\gamma$  为靶材的气态绝热指数, 将回喷靶材看作单原子理想气体, 则  $\gamma = 5/3$ ;  $E_s$  为升华能。空间步长和时间步长的取法使格式粘性保证了差分方程的稳定性[9], 所以没有引入人为粘性项。

考虑到采用瞬时能量沉积会带来非常大的误差, 所以依据以下原则给出电子束在膨胀了的靶材中的能量沉积, 即假设电子束在靶内同一深度处的能量沉积密度与未膨胀的情况是相同的, 离开原靶面位置的靶材中的能量沉积密度与原靶面位置处相等。

纯 Euler 方法的难点在于自由面的跟踪。本文中自由面采用以下原则进行简化处理: 如果表面网格与空网格相邻, 其压力为 0, 且它与空网格相邻边界上的速度等于对边的速度。当与空网格相邻的表面网格的气体原子密度小于  $10^{13}/\text{cm}^3$  时, 在计算中将被舍去。

## 4 计算结果与讨论

图 4 为与实验条件相同的三层叠靶在强流脉冲电子束辐照下靶的动力学行为的模拟结果, 从左至右的时刻依次为 80 ns,  $1 \mu\text{s}$  和  $2 \mu\text{s}$ 。在这三个时刻原子密度为  $10^{13}/\text{cm}^3$  的自由面的轴向速度分别为 5.3, 9.7 和 9.3 mm/ $\mu\text{s}$ 。同一时刻不同等密度面的轴向速度随着密度的增加而降低, 例如  $2 \mu\text{s}$  时原子密度为  $10^{20}/\text{cm}^3$  的等密度面的轴向速度约为 2 mm/ $\mu\text{s}$ 。

按照上述模型, 模拟了相同电子束作用下 1 mm 厚钽靶的喷射行为。结果表明  $2 \mu\text{s}$  时自由面速度为 9.5 mm/ $\mu\text{s}$ , 略高于叠靶, 说明自由面的运动受到靶内热激波的影响较小, 仅仅和靶表面的能量沉积密度有关。

由以上模拟结果可以看出, 回喷靶材速度的模拟结果比实验结果明显偏大, 其原因主要在于以下几个方面: (1)

因为在估算中只取了照片中较亮的部分, 所以得到的速度值并不是真正的回喷靶材前沿的轴向速度, 而模拟结果也表明回喷靶材不同等密度面的轴向速度随着密度的增加而降低; (2) 计算电子束的能量沉积时部分电子束的参数为理想情况下的, 比如电子束的面密度分布和焦斑大小; (3) 实际情况下未被气化的靶材也有其流体力学及弹塑性力学行为, 而模拟中均把它们当作固壁处理; (4) 靶材的状态方程以及计算格式带来的误差也会对最后结果造成影响。

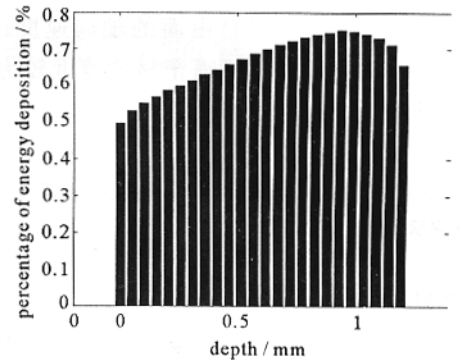


Fig. 3 Histogram of energy deposition of electron beam in 1.2 mm tantalum target

图 3 电子束能量沉积直方图

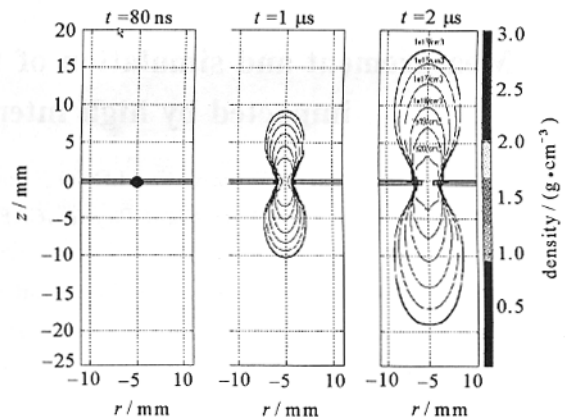


Fig. 4 Target density contour at different time

图 4 不同时刻靶材的密度分布

## 5 结 论

实验表明,钽金属靶在强流脉冲电子束轰击下,回喷靶材的轴向速度将超过  $2.9 \text{ mm}/\mu\text{s}$ 。而模拟结果表明理想情况下回喷靶材自由面的轴向速度可达  $9.7 \text{ mm}/\mu\text{s}$ 。根据实验和模拟结果,为了有效地阻挡回喷靶材,采用  $4 \text{ mm}/\mu\text{s}$  估算回喷靶材的速度较为合理,而快门动作的速度还应由快门离靶的距离以及束管道直径等参数所共同决定。

致 谢 本文实验工作得到了中物院流体物理研究所加速器运行小组,以及王丽萍、王景川、田建华和张光生助理工程师等同志的大力配合和帮助,在此表示衷心感谢。

## 参考文献:

- [1] Pincosy P A, Back N, Bergstrom P M, et al. Multiple pulse electron beam converter design for high power radiography[J]. *Review of Scientific Instrument*, 2001, **72**(6): 2599—2604.
- [2] 周南,乔登江.脉冲束辐照材料动力学[M]. 北京:国防工业出版社,2002. (Zhou N, Qiao D J. Materials dynamics under pulse beam radiation. Beijing: National Defence Industry Press, 2002)
- [3] 龙继东,林郁正,罗飞,等. 12MeV 强流脉冲电子束对钽靶的破坏研究[J]. 高能物理与核物理, 2004, **28**(5): 564—568. (Long J D, Lin Y Z, Luo F, et al. Destruction study of tantalum target impacting by electron beam with 12 MeV. *High Energy Physics and Nuclear Physics*, 2004, **28**(5): 564—568)
- [4] 禹海军,龙继东,李勤,等. 叠靶研究[J]. 强激光与粒子束, 2002, **14**(5): 797—800. (Yu H J, Long J D, Li Q, et al. Development of distributed target. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, **14**(5): 797—800)
- [5] Thomas J T K, Charles M S, Peggy J C. Electron beam-target interaction and spot size stabilization in flash X-ray radiography[J]. *Physics of Plasmas*, 2000, **7**(5): 2215—2223.
- [6] Sampayan S, Buckles R, Caporaso G, et al. Beam-target interaction experiments for multipulse bremsstrahlung converters applications[A]. Proceedings of the 2001 Particle Accelerator Conference[C]. 2001. 330—332.
- [7] 畅里华,汪伟,刘宁文,等. 喷气 Z-pinch 高速扫描摄影技术研究[J]. 强激光与粒子束, 2003, **15**(4): 352—354. (Chang L H, Wang W, Liu N W, et al. Study on gas-puff Z-pinch by fast photography. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(4): 352—354)
- [8] Misra A, Thareja R K. Investigation of laser ablated plumes using fast photography[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1999, **27**(6): 1553—1558.
- [9] 李德元,徐国荣,水鸿寿,等. 二维非常流体力学数值方法[M]. 北京:科学出版社,1987. 46—74. (Li D Y, Xu G R, Shui H S, et al. Two-dimensional numerical method for time-dependent fluid dynamics. Beijing: Science Press, 1987. 46—74)

## Measurement and simulation of the back-ejecta of tantalum target material impacted by high intensity current pulse electron beam

ZHU Jun, ZHANG Lin-wen, LONG Ji-dong, LI Jing, YU Hai-jun, SHANG Chang-shui, LI Jian  
(Institute of Fluid Physics, CAEP, P. O. Box 919-106, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** Fast photography is used to investigate the back-ejecta of tantalum target material after interaction with high intensity current pulse electron beam. Velocity of back ejecta of tantalum target material is presented. The electron beam energy deposition and the beam-target interaction dynamics is also computed numerically by EGS4 program and solving the series of Euler equations for mass, momentum and energy respectively. The experimental result shows that the axial velocity of back ejecta target material is faster than  $2.9 \text{ mm}/\mu\text{s}$ , while the simulation gives a velocity of  $9.7 \text{ mm}/\mu\text{s}$  under the ideal conditions. Both results give the necessary parameters for the shutter used to block off the target ejecta.

**Key words:** Pulse electron beam; Beam-target interaction; Back-ejecta; Fast photography