

文章编号: 1001-4322(2010)05-1121-04

强流脉冲电子束作用下钽金属靶膨胀的轴向约束*

朱 隽, 禹海军, 陈 楠, 江孝国, 李 劲, 石金水

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 研究了强流脉冲电子束与钽金属靶相互作用后靶材流体动力学膨胀的轴向约束问题。由于电子束在金属钽和钽内的能量沉积存在差异, 未完全气化的钽箔对气化膨胀的钽材能够起到约束作用, 并且可以通过吸收钽的能量来降低钽的膨胀速度。通过分析比较电子束在靶上形成孔洞的形貌以及高速相机拍摄得到的不同时刻靶材喷射的图像, 证实了钽箔能够对钽金属靶的轴向膨胀起到一定的约束作用。尤其是电子束打靶过后 $1 \mu\text{s}$ 内的初始阶段, 约束效果比较明显。

关键词: 脉冲电子束; 钽靶; 束靶相互作用; 流体动力学

中图分类号: TN25 **文献标志码:** A **doi:**10.3788/HPLPB20102205.1121

20 MeV 的强流脉冲电子束经过加速聚焦后, 打在韧致辐射转换靶上, 产生光子平均能量数 MeV 的硬 X 射线。以美国的 DARHT II 装置为例, 该装置计划在 $1.7 \mu\text{s}$ 内有 4 个束脉冲依次打到韧致辐射转换靶上。电子束在极短时间内的能量沉积导致靶材温度急剧升高, 达到数万 K。由于入射电子束的面密度分布为高斯分布, 此时束靶作用区处于一个非常复杂的物理状态, 由中心向四周依次为等离子体态, 气态, 液态, 固态, 等离子体态和气态的靶物质将迅速向四周膨胀飞散。在大型 X 光机 AIRIX 上测得的靶材飞散速度约为 $5 \text{ mm}/\mu\text{s}$ ^[1], 在国内同等水平的“神龙一号”装置上, 利用超高速转镜相机拍摄得到的靶材飞散速度大于 $2.9 \text{ mm}/\mu\text{s}$ ^[2]。靶材的迅速膨胀使束靶作用区靶物质的减少, 将导致后续脉冲没有足够的靶材与之作用产生足够剂量的 X 射线, 而在数百 ns 的脉冲间隔内显然无法更换靶材。高速喷射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^[3-4]。因此如何约束靶材的轴向膨胀将是提高转换靶耐轰击能力的一个关键问题。

1 束靶相互作用

能量 20 MeV、流强 2.5 kA、脉冲宽度 80 ns、焦斑为 1.5 mm(FWHM)的电子束轰击钽金属靶后, 在束脉冲作用期间电子束将部分能量沉积在靶物质中, 导致靶材的迅速升温, 最高可达到 35 000 K。为了避免束靶作用区靶材过快地飞散, 在设计转换靶时主要采取的思路是降低单位体积内的能量沉积, 从而减轻转换靶的破坏程度。文献[5]从能量沉积密度和热激波两个方面解释了相同电子束轰击过后钽叠靶(1.2 cm, 24 层 0.05 mm 厚钽箔)比钽实心靶(1.2 mm)破坏程度较轻的原因。为了抑制靶物质的轴向膨胀, 我们考虑用轻材料对回喷靶材进行阻挡。通过 MCNP 4B 程序对电子束在不同靶材中的能量沉积进行了模拟。

MCNP 4B 程序产生于美国的 Los Alamos 国家实验室, 它可以模拟中子、光子和电子在受照射物质中耦合输运过程, 并能够计算出电子和光子在物质中的能量沉积。在模拟计算中, MCNP 4B 程序考虑了所有可能的物理过程, 对于电子输运的计算, 包括能量损失的离散、多次弹性散射和产生次级电子、韧致辐射连续谱、特征 X 射线谱和湮没辐射; 而对于光子输运的计算, 则包括了光电效应、康普顿散射以及电子偶的产生。

计算中假设电子束平行入射, 无发射度和能散度。电子束能量 20 MeV, 脉冲宽度 80 ns, 束流强度 2.5 kA, 电子束面密度为高斯分布, FWHM 宽度为 1.5 mm。靶材均取厚度为 0.1 mm 的箔片。计算结果如表 1 所示。

由模拟结果可以看出, 在能量 20 MeV, 脉冲宽度 80 ns, 束流强度 2.5 kA, 焦斑大小 1.5 mm 的电子束作用下只有钽靶靶心处于完全气化状态, 而其它靶材仍处于熔化气化混合状态。由于熔化状态下物质的膨胀速度远小于气化状态, 因此, 未完全气化的轻材料箔片可以对气化膨胀的钽材起到一定的阻挡作用。同时由于轻

* 收稿日期: 2009-02-09; 修订日期: 2009-10-14

基金项目: 国防科技基础研究基金项目

作者简介: 朱 隽(1981—), 男, 硕士, 主要从事束靶相互作用方面的研究; zhujun98@tsinghua.org.cn。

材料气化需要大量的能量,因此可以吸收喷射出来的钽材中的能量,从而降低靶材的速度。考虑到大量的靶残骸进入加速腔后对加速器会造成损伤,因此箔片不能是易碎材料。同时考虑靶箔的强度因素,实验中决定选择钛箔作为阻挡材料。

表 1 电子束在不同材料中的能量沉积

Table 1 Energy deposition in different materials by electron beam

material	specific energy for total vaporization	energy deposition in target center
	$/(J \cdot g^{-1})$	by electron beam/ $(J \cdot g^{-1})$
Ta	5 085	7 661
Ti	10 985	9 878
Si	18 056	10 984
Al	13 785	10 558
C	31 788	11 312

2 测量系统的结构

实验中高速分幅 ICCD 相机的拍摄时间间隔共分为 10, 20, 40, 80, 160, 320, 640, 1 280 ns 共 8 档可调,曝光时间分为 3 档: 3, 5, 10 ns^[6]。鉴于靶物质喷射的持续时间为 μs 量级,因此相机拍摄时间间隔主要选择为 320 ns 和 640 ns,为使图像曝光充分,曝光时间选择为 10 ns。由于加速器大厅的实验环境存在强电磁和 X 射线干扰,因此系统采用了金属盒及铅砖进行屏蔽,如图 1 所示。相机从靶侧面进行拍摄,静态图像如图 2 所示。

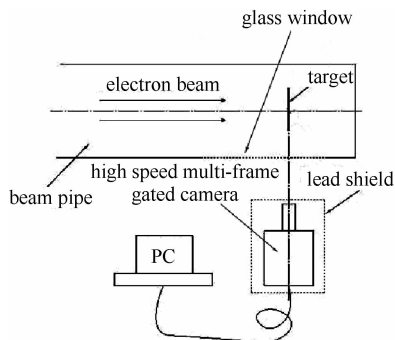


Fig. 1 Layout of measurement system

图 1 实验布局

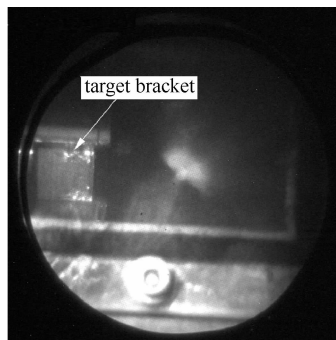


Fig. 2 Static picture of target

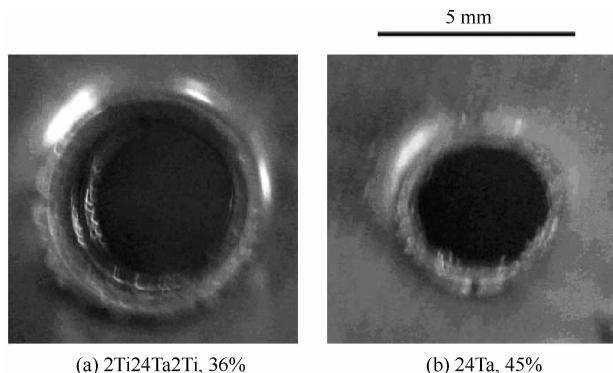
图 2 静态图像

3 实验结果及分析

为了确认轻材料对靶物质膨胀的约束效果,实验中采用了 2 种靶:一种是 24 层 0.05 mm 厚钽箔叠加而成的叠靶(24Ta 靶),另一种则是在上述钽叠靶前后表面分别设有 2 层 0.1 mm 厚的钛箔(2Ti24Ta2Ti 靶)。由于叠靶的压制原因导致上述叠靶的孔隙度有一定的差别,前者为 45%,后者为 36%。电子束打靶后靶前表面形成的破孔如图 3 所示,加有钛箔的靶上形成的孔直径比没有约束的钽靶高出约 30%,其孔洞四周的靶箔存在明显的翻卷现象,而没有约束的钽叠靶孔四周较为平滑。造成这种现象的主要原因是轴向膨胀的钽材受到钛箔的约束,转而膨胀更多地沿径向发展。

在束流聚焦状况不佳时,电子束在靶内的能量沉积密度明显降低,此时也能够观察到钛箔对靶膨胀的约束作用。图 4(a)中前后表面的破孔仅为内部孔径的一半左右,而图 4(b)中可以看到虽然靶内部出现了空心的现象,靶的前后表面仍然保持完整。

高速相机拍摄得到的动态图像也证实了钛箔对钽靶膨胀的约束作用,如图 5 所示。高速相机拍摄得第一副图像为电子束打靶后 80 ns 时间,拍摄间隔取 320 ns。由于电子束打靶期间存在很强的辐射和电磁干扰以及相机自身各个通道存在差异,所以一次拍摄中不同图像的背景干扰存在差异,但是噪声并不妨碍对靶材喷射



(a) 2Ti24Ta2Ti, 36%

(b) 24Ta, 45%

Fig. 3 Holes in targets' front surfaces

图 3 靶前表面形成的孔

的观察。

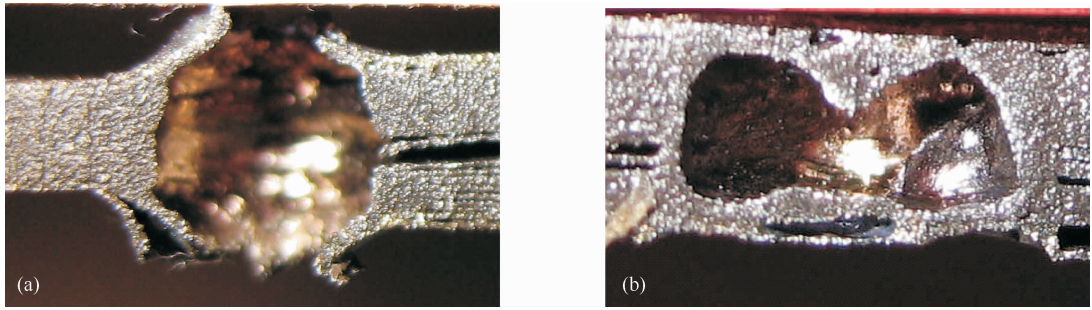


Fig. 4 Destruction of 2Ti24Ta2Ti target under weak-focused e-beam

图 4 束流聚焦效果不佳时的 2Ti24Ta2Ti 靶毁伤效果

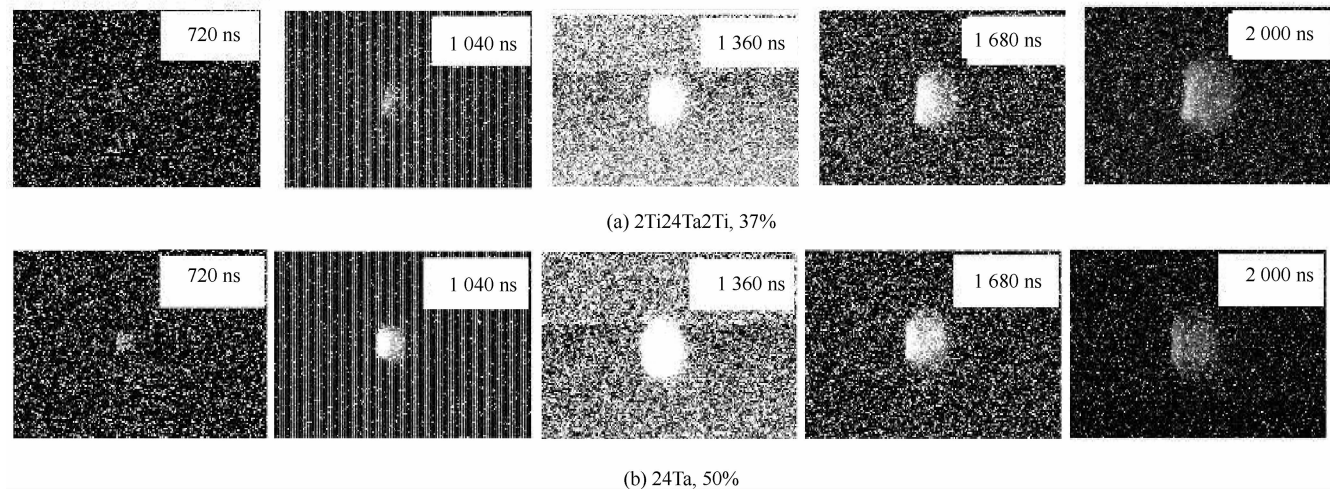


Fig. 5 Comparison of target material ejecting images recorded by fast photography

图 5 高速相机拍摄得到的两种靶的喷射图像

在 1 360 ns 前的 3 幅动态图像可以明显地看到 2Ti24Ta2Ti 靶的靶材轴向膨胀距离小于 24Ta 靶。尤其是在喷射刚刚开始阶段,2Ti24Ta2Ti 靶的靶材喷射并不明显,这是由于处于气液混合态的 Ti 材料的温度仅处于 Ti 的沸点,约 3 500 K,而此时 Ta 材料的温度可以高于 20 000 K。在 1 360 ns 时刻,24Ta 靶的靶材轴向膨胀距离约为 4.8 mm,而 2Ti24Ta2Ti 靶的靶材轴向膨胀距离约为 3.7 mm。此时刻两幅图像中喷射物的亮度基本相同,因此可以认为膨胀的 Ta 材突破了 Ti 材料的约束,但是由于前期受到了 Ti 材的阻挡,因此喷射距离会小于没有约束的 Ta 材。在 1 680 ns 时刻,由于喷射靶材的内能逐渐转变为动能,喷射物的温度逐渐降低,导致亮度下降,相机逐渐无法分辨喷射物边缘与背景。

4 结 论

本文研究了强流脉冲电子束作用下钛箔对 Ta 金属靶轴向膨胀的约束作用。结合电子束在靶上形成的孔洞的形貌以及高速相机的拍摄结果分析,钛箔对靶材轴向膨胀具有一定的约束作用,尤其是电子束打靶过后 1 μ s 内的初始阶段,约束效果比较明显。

参考文献：

[1] Caron M, Cartier F, Coeuret A, et al. High intensity high energy e-beam interacting with a thin solid state target: first results at AIRIX [C]//Proceedings of 2005 Particle Accelerator Conference. 2005:1982-1984.

[2] 朱隽, 章林文, 龙继东, 等. 强流脉冲电子束轰击下回喷靶材速度测量与数值模拟[J]. 强激光与粒子束, 2005, 17(4): 599-602. (Zhu Jun, Zhang Linwen, Long Jidong, et al. Measurement and simulation of the back-ejecta of tantalum target material impacted by high intensity current pulse electron beam. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(4): 599-602)

[3] 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.

[4] Chen Yujuan, Paul M B, George J, et al. DARHT2 X-ray converter target system comparison[C]//Proceedings of 1999 Particle Acceleration

tor Conference. 1999;1827-1829.

- [5] 朱隽, 章林文, 龙继东, 等. 高能通量脉冲电子束作用下钽靶破坏初步研究[J]. 强激光与粒子束, 2005, **17**(10):1581-1584. (Zhu Jun, Zhang Linwen, Long Jidong, et al. Basic study on destruction of tantalum target bombarded by high energy flux pulse electron beam. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(10):1581-1584)
- [6] 江孝国, 郭宝瓶, 邓建军, 等. 用于电子束参数测量的高速分幅相机[J]. 光电工程, 2006, **33**(5):99-103. (Jiang Xiaoguo, Guo Baoping, Deng Jianjun, et al. High-speed multi-frame gated camera for electron beam parameters measurement. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(5):99-103)

Restriction of tantalum target expansion along axis bombarded by high-current pulsed electron beam

Zhu Jun, Yu Haijun, Chen Nan, Jiang Xiaoguo, Li Jin, Shi Jinshui

(*Institute of Fluid Physics, CAEP, P. O. Box 919-106, Miangyang 621900, China*)

Abstract: The restriction of tantalum target expansion along axis bombarded by high-current pulsed electron beams was studied. The vaporized tantalum target can be blocked by the titanium foil partially vaporized due to the difference of energy deposition in both materials by the electron beam, and furthermore, the energy in tantalum can be absorbed by titanium to lower the expansion speed. By comparison of the holes in the targets formed by the electron beam and the target expansion pictures captured by high speed camera, the restriction of the titanium foil to the tantalum target has been confirmed, and such effect is distinct within 1 μs after the electron beam reaching the target.

Key words: pulse electron beam; tantalum target; beam-target interaction; fluid mechanics