

12MeV 强流脉冲电子束对钽靶的破坏研究*

龙继东^{1;1)} 林郁正¹ 罗飞² 谷卓伟² 石金水²

1(清华大学工程物理系 北京 100084)

2(中国工程物理研究院 绵阳 621900)

摘要 强流高能电子束由于具有很强穿透能力,在材料内的能量沉积具有体分布特点,因此其对材料的辐照破坏体现出和低能电子以及 X 光等不同的特点. 本文分析了金相显微镜和扫描电镜下的被 12MeV 的强流电子束轰击后的 1.2mm 厚度钽靶的破坏点形貌,其破坏断面体现为力学韧性撕裂,且关于靶中心基本对称. 为了解释这种现象,文中用蒙特卡罗的数值模拟方法给出了电子束在钽靶内的沉积能量分布:能量沉积呈现靶中心吸能高,两侧低,且关于中心基本对称的特点. 针对破坏断面特点和靶的吸热情况,我们给出高能电子束对靶材破坏初步的定性解释:认为高能电子束的强穿透能力使得靶材各部分几乎同时加热. 靶材在极短时间里吸收大量能量,发生剧烈膨胀. 由于能量沉积特点,中心部分材料膨胀最厉害,受到两侧边界的强烈约束,将产生两大小相近的热激波相对传播. 激波在两侧自由界面反射,产生向内传播稀疏波. 当两个稀疏波在靶中心区域相遇,就造成了靶对称撕裂的破坏形态.

关键词 电子束 韧致辐射靶 热激波 稀疏波 蒙特卡罗法

1 引言

韧致辐射转换靶是研究物体高速动力学过程的大型 X 照相装置中结构简单但重要的部件. 它把电子束能转换成需要的 X 光. 通常这些大型 X 光机能产生 10—20MeV 的高能电子束. 以美国的 DARHT 和 FXR 装置为例,电子的能量 18—20MeV,束流密度超过 10kA/cm²,脉宽约 90ns 量级. 这种条件下束流对靶材具有强烈的破坏效应,一个束脉冲足以打穿转换靶. 但在单脉冲工作模式下,束流持续的几十 ns 里,靶来不及形变,所以能完成 X 光转换任务. 简单的采取更换靶的方法就能进行下一次工作,因此也就没有深入研究靶的破坏机理. 但当前这类 X 光机向多脉冲的工作模式进步时,如美国的 DARHT-II^[1],计划 2 μ s 内有四个束脉冲依次打到转换靶上,问题就产生了. 这时,靶的破坏很可能影响后续脉冲产生 X 光的能力,而这么短时间里无法更换靶

材,因此如何提高转换靶持续工作能力就成为关注的要点之一. 而提高靶的工作能力,首先是弄清楚靶的破坏机理.

电子束辐照的动力学研究最初是用于模拟 X 射线辐照材料与结构时产生的热-力学效应,后又用于原材料改性处理. 正是这些研究用途以及强流高能电子束装置的昂贵造价使得过去这方面的研究主要集中在对 MeV 以下能量的电子束辐照效应研究. 这种参数下的电子束在材料中的能量沉积多集中在入射材料的表层区域,破坏体现为对物质表面的熔化或汽化烧蚀以及后续的力学破坏行为^[2]. 而在研究物体动力学行为的辐照装置中,电子能量在 10MeV 以上,对于 1mm 左右厚度的靶材具有了很强穿透能力,靶材各部分都能从入射电子那儿获得能量. 因此其对靶材的破坏体现出和低能电子以及 X 光不同的特点来^[3],用低能电子和 X 光对材料的辐照破坏的理论解释不能很好的和观察到的破坏断

2003-06-26 收稿,2003-11-25 收修改稿

* 国防科技基础研究项目资助

1) E-mail: longjidong@tsinghua.org.cn

面吻合。同时,由于热效应的存在,使得其破坏也不同于纯力学的飞片撞击。所以本文针对具有 12MeV 动能,脉冲功率达 10^{10} W 的强流电子束对钽靶的破坏进行了专门研究。

本文的第 2 节是实验介绍,第 3 节是用金相显微镜和扫描电镜观察到的被破坏的金属钽靶的情况和唯象的分析。第 4 节是数值模拟,得到了 12MeV 电子束在靶内的能量沉积分布。第 5 节是破坏机理分析。最后一节是结论。

2 实验介绍

实验在中国工程物理研究院的 12MeV 直线感应加速器上进行。机器的正常工作状态是束流约 2.2kA,束脉冲半高宽 90ns,电子能量 12MeV。采用 1.2mm 钽靶,垂直于束流轴线放置,束靶作用点直径大小约 4mm。让束流多次轰击同一块钽靶的不同位置,然后取下靶片分析。分析采用线切割方式,从靶材中小变形、大变形、泡状破裂等区域分别选取分析试样,对泡状内部采用扫描电子显微镜观察分析;对于外表面,使用金相显微镜观察。不同束靶作用点破坏形态的差异主要是由于产生束输运磁场的恒流源工作不稳定以及其他机器参数变化造成束流损失的结果。

3 显微图像及分析

宏观上看,束流作用后靶面上有的被打穿成孔,孔径约 5—6mm,有的是起鼓包。需要指出的是,没有打穿的靶正反表面看上去都很完整,没有蚀坑。孔和鼓包在靶材的正反面的形态都比较一致,见图 1。从剖面上看,裂纹源于钽靶断面中线部位,或关于中线对称成对出现,然后以撕裂和类似于胀型的方式沿径向扩展和纵向对称发展。所以可以认为钽靶的贯穿经历小变形、大变形、贯穿等几个过程。

在最初产生裂纹的地方,发现有韧性撕裂和细小空洞,并有少量珠状颗粒,见图 2。为了对比,图 3 展示了在 12000℃—15000℃ 下电弧切割后钽靶断面典型的熔融冷凝形貌,因为表面张力的存在,使熔化的钽金属冷凝聚集成团状。两图对比说明电子束破坏钽靶和电弧高温溶化切割靶材有所不同,前者没有大范围金属熔融的发生,力学破坏的特征明显。

进一步观察,发现在金属泡(图 1(c))的不同部位,破坏的显微形貌有所不同。在金属泡边缘部位,

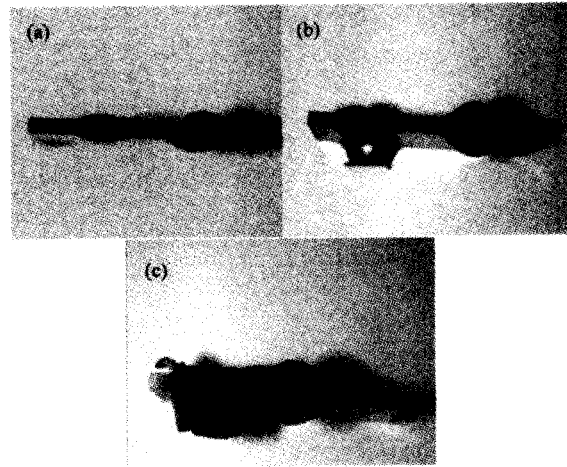


图 1 靶的剖面照相,三类典型的电子束形成的破坏情况



图 2 韧性撕裂、孔洞和珠状颗粒 $\times 100$

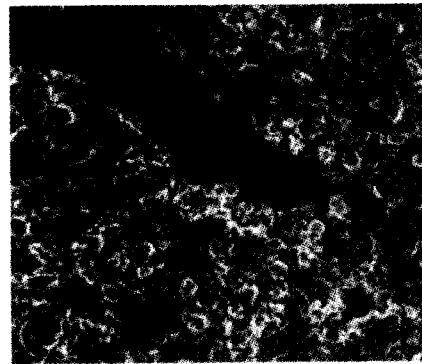
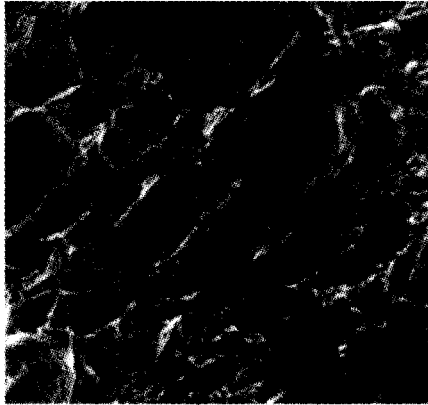


图 3 熔融冷凝形貌 $\times 300$

看到的是阶梯形貌的层状撕裂,并有河流状花纹,如图 4 所示。该图样和 Ta-12W 合金在 17GPa 冲击应力下的解理层裂断面很相似^[4],不同是前者的撕裂面上还附着有熔化的金属颗粒,体现了热的作用。这些颗粒大小差异很大,可能是钽中低熔点的杂质所形成。

而在气泡状变形靠近顶部区域,看到的则是金属晶粒之间无牵连撕裂和阶梯状撕裂共存的图样。这种晶粒无牵连的撕裂,见图 5,和纯粹的冲击载荷

图 4 阶梯状层状撕裂 $\times 300$ 图 5 晶间裂缝 $\times 2000$

对靶的破坏不同,可以认为是一种热效应:熔化或气化过程使得晶界层被破坏,晶粒间结合变弱.同时这里并没有观察到大规模的熔融迹象,撕裂仍是主要的.

上述在分析说明电子束对靶的破坏是一种热力耦合效应,并以力学韧性撕裂为主.如果能知道电子束在靶内的能量沉积分布,对解释靶被破坏的机理有重要帮助,所以下面分析电子束在靶内的能量沉积情况.

4 电子束在靶内的能量沉积

电子束轰击到靶上后,电子能量转化成 4 部分:透射电子的能量;产生的 X 光能量;沉积在靶内被靶吸收的能量和被反射的粒子所含能量.由于束脉冲持续时间只有几十个 ns,又是处于强射线的环境,很难直接实验测量靶内电子束能量沉积分布.迄今为止,蒙特卡罗法不失为一种比较理想的常用方法,可以给出满意的结果.这里采用描述电子光子耦合运输的蒙卡程序 EGS4^[5]作为模拟工具.

由于 EGS4 代码是没有考虑入射电子彼此空间电荷效应影响以及靶材物性随时间变化的单粒子模拟代码,所以首先关心的是强流电子束的空间电荷效应和靶材物性随时间变化这两种因素对模拟结果准确性的影响.分析认为:即使电子束流强度达到几十 kA/cm^2 量级,束流中电子的密度相对于靶物质原子密度来说仍然非常小,金属中的自由电荷足以屏蔽电子束电子间的互相影响;从电子束与物质相互作用的理论^[6]可以知道影响电子和靶相互作用的关键在于靶物质密度的改变.而束脉冲持续的短时间里靶来不及形变,密度变化小,所以仍可以认为靶参数不变.

通常靶室真空度约 10^{-2} — 10^{-3} Pa,打靶电子入射轨迹与靶表面法线的夹角均方根值仅几十 mrad,因此模拟中简化参量,取靶外部空间为真空条件,电子垂直于靶表面入射.设定电子能量 12MeV,钽靶厚 1.2mm,沿纵向均分成 24 层,统计 10^6 次电子入射在这 24 层片层内形成的能量沉积纵向分布,结果见图 6.图中横坐标代表片层在靶中所处的位置,纵坐标代表平均每个人射电子贡献给靶片层的能量.靶吸收总能量约占入射电子能量的 1/3,其分布特点是关于靶中心近似对称呈抛物线分布,中心部位高,两侧低,中心位置比两侧外表面的能量吸收密度高 65% 以上.这一点和低能电子和 X 光的表面沉积特性完全不同.正是这种能量吸收的特点决定了靶破坏的机制.

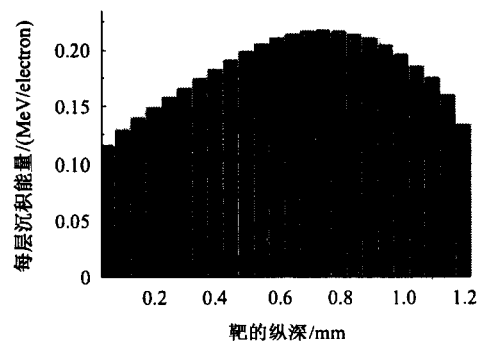


图 6 钽靶内电子能量的沉积分布图

如果需要电子沉积能量在靶内的二维分布(假定电子束分布轴对称),则可根据电子束入射时的径向分布函数和模拟的能量沉积纵向分布数据点拟合的函数直接相乘得出.因为本文以定性分析为主,所以采用一维即可.

虽然描述电子在物质中能量损失的 Bethe 公式^[7]只能给出电子通过碰撞方式传递给靶材的能

量,无法考虑其他物理过程,如光子对靶内沉积能量的贡献,但是 Bethe 公式能比较准确给出电子自身能量的变化.用该解析公式计算得到的穿过靶后的电子剩余能量和模拟的穿靶电子平均剩余能量一致,这说明图 6 的模拟结果是可信的.

5 靶的破坏机理分析

曾有两种 12MeV 电子束对靶的破坏机理的解释:1) 电子束造成材料表面以液态和气态形式从靶前面喷射出去.根据能量守恒,在靶材的其余部分将产生热激波向材料内部传播.当热激波传到靶材背面自由面,高压卸载,向靶内反射一个稀疏波,与来自受照面的稀疏波相互作用,形成对材料的拉伸.当这种拉伸应力超过材料动态断裂强度时,就会发生层裂破坏^[8];2) 根据靶破口形态,认为靶中心部分气化,体积膨胀,形成鼓包或是破口而出.

第二种解释仅仅是一种建立在日常生活经验上的唯像解释,能否适用于脉冲载荷条件下还存在疑问.而根据模拟得到的靶内能量沉积情况和钽的物理性质,通过计算可以判定即使吸热密度最高的靶中心点也只能到气化点,但克服不了汽化热.这点已经由第二节中的金相分析证实:没有大规模熔化现象发生,断面呈现的是尖锐的撕裂外貌,所以解释二不能说明问题.

第一种解释借用一定条件下脉冲低能(1MeV 以下)电子束辐照、脉冲 X 光辐照、脉冲激光辐照等破坏机制,但其在描述热激波的形成机制时已经限定了热激波来源于靶表面烧蚀形成的反冲压缩应力.实际上还有一种热激波的形成机制,脉冲载荷造成材料内不均匀热膨胀,从而产生冲击热应力.由于第二节的金相分析证实靶表面没有明显烧蚀痕迹,因此解释一是不准确的.但即使让解释一中的热激波包含冲击热应力,仍不能很好的解释图 1 的断面形貌.这是因

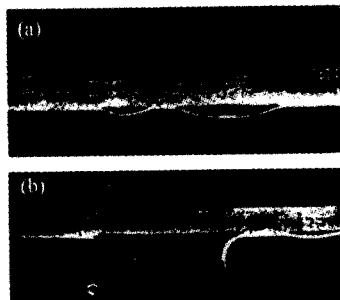


图 7 电子束(0.75—1MeV)辐照试件的横截面
(a) 密实铜合金试件;(b) 密实钢试件.

为上述各类脉冲束在靶内的能量沉积体现为面沉积,其后续力学效应的破坏形貌一般没有对称性,典型的见图 7^[9].而 12MeV 电子束在靶内的能量沉积则是一种体沉积,中间高,两侧低.能量沉积的差异必然导致冲击热应力分布的不同,从而在靶内产生不同的冲击波过程,形成不同的破坏形貌.

在前面两节的基础上,我们认为靶的破坏过程如下:首先是靶在束脉冲持续期间吸收大量的热能.由于高能电子束穿越靶的时间极短,因此可以认为靶是各个部分同时被加热的,且靶材中心部分吸热高,两侧低.靶中心区域热膨胀最厉害,必然受到周围边界来不及膨胀的材料强烈约束.于是在中心区域两侧,且温度梯度较大的区域热应力最强,形成最具破坏力的两个强度接近的相对而行的热激波.当热激波到达靶两侧自由边界后,高压卸载,形成向内传播稀疏波.由于电子束能量在靶内沉积关于靶中线前后对称,所以靶材物性也会基本对称变化,因此两个稀疏波会在靶中心区域相遇,形成比较对称撕裂的破坏形态.图 8 描述的就是靶内主要的波过程.

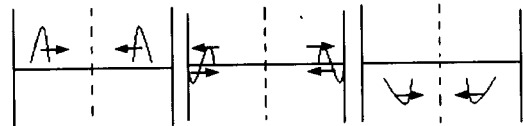


图 8 12MeV 电子束轰击下靶内稀疏波的形成过程

实际上,上述描述的仅是靶内发生的主要波过程,还有其他复杂的波过程同时存在,例如一旦层裂发生,层裂面又作为新的自由面反射传来的冲击波;电子束脉冲结束时也会在材料表面产生向内传播的稀疏波.在图 1(b)中,可以看到在靶的正反面处也发生了层裂现象.它有可能是热加载停止时靶前后表面产生的稀疏波和先前的热应力产生的稀疏波相互作用的结果,仍具有对称性.当入射电子束流强较低时,中心处层裂发展不充分,于是就可以在靶内同时看到三处层裂.这些都说明脉冲束在材料内的体能量沉积会引发较复杂的力学行为,更准确详细的理解有待进一步的实验和数值模拟.

6 结论

12MeV 强流电子束对金属钽靶的破坏主要体现为一种力学上的韧性撕裂.由于其在靶内的能量沉积是一种体沉积,且具有中心高,两侧低,关于中心基本对称的特点,所以靶内发生的冲击波过程有别于

1MeV 以下的低能电子束和 X 光等其他脉冲束对靶材的辐照破坏. 分析认为主要破坏机制是由于靶材吸热后发生剧烈膨胀, 由于靶材中心部分吸热最多, 膨胀最厉害, 必然受到周围边界来不及膨胀的材料强烈

约束, 在中心区域两侧, 热应力最强的区域形成最具破坏力的两个热激波. 两个热激波相对传播, 在两侧自由面反射形成向内传播的稀疏波. 当两个稀疏波在靶中心相遇, 就造成了对称撕裂的破坏形态.

参考文献 (References)

- 1 Burns M J et al. Status of The DARHT Phase 2 Long-Pulse Accelerator. In PAC2001. Chicago:2001. 325
- 2 ZHOU Nan, QIAO Deng-Jiang. Materials Dynamics Under Pulse Beam Radiation. Beijing: National Defence industrial Publisher, 2002. 485—486 (in Chinese)
(周南, 乔登江. 脉冲束辐照材料动力学. 北京: 国防工业出版社, 2002. 485—486)
- 3 ZHOU Nan, QIAO Deng-Jiang. Materials Dynamics Under Pulse Beam Radiation. Beijing: National Defence industrial Publisher, 2002. 163 (in Chinese)
(周南, 乔登江. 脉冲束辐照材料动力学. 北京: 国防工业出版社, 2002. 163)
- 4 ZHANG Ting-Jie, ZHANG De-Yao, DING Xu. Rare Metal Materials and Engineering, 1998, 27:32—36 (in Chinese)
(张廷杰, 张德尧, 丁旭. 稀有金属材料与工程, 1998, 27:32—36)
- 5 Walter R. Nelson, Hideo Hirayama and David W. O. Rogers, THE EGS4 CODE SYSTEM, SLAC-Report-265, December 1985
- 6 Groom D E et al. European Physical Journal, 2000, C15:1
- 7 ZHOU Nan, QIAO Deng-Jiang. Materials Dynamics Under Pulse Beam Radiation. Beijing: National Defence industrial Publisher, 2002. 489 (in Chinese)
(周南, 乔登江. 脉冲束辐照材料动力学. 北京: 国防工业出版社, 2002. 489)
- 8 DENG Jian-Jun. Beam-Target Interaction and Measurement of X-Ray Spot Size. In: Editorial Office of High Power Laser and Particle Beams. Proceedings of The Conference on 10MeV Linear Induction Accelerator. Mianyang: High Power Laser and Particle Beams Press, 1994. 206—209. (in Chinese)
(邓建军. 束靶相互作用及 X 光焦斑测量. 见: 强激光与粒子束编辑部编辑. 10MeV 感应直线加速器论文集. 绵阳: 强激光与粒子束出版社, 1994. 206—209)
- 9 LI Qing-Yuan, JIANG Yuan-Kun, Du Shi-Gang et al. Explosion and Shock Waves, 1985, 5(3): 27—34 (in Chinese)
(李清源, 蒋垣昆, 杜世刚等. 爆炸与冲击, 1985, 5(3): 27—34)

Destruction Study of Tantalum Target Impacted by 12MeV Electron Beam*

LONG Ji-Dong^{1,1)} LIN Yu-Zheng¹ LUO Fei² GU Zhuo-Wei² SHI Jin-Shui²

1(Department of Engineering Physics of Tsinghua University, Beijing 100084, China)

2(Engineering Physics Institute of China, Mianyang 621900, China)

Abstract The radiation destructive appearance caused by intensive electron beam current with 12MeV energy reveals different mechanism of fracture from those caused by lower energy electron or X-ray due to the strong penetrating ability of the electron. In the paper, the fracture profiles of the 1.2mm Ta target, which is destructed by 12MeV electron beam, are studied using microscope and scanning electron microscope. The result indicates mechanical tear is the major reason, and moreover, the tear fracture is almost symmetrical. In order to understand this, the energy deposit of electron beam along the depth of the target is given out by Monte-Carlo simulation, which is also symmetrical and higher in center, lower in sides. A preliminary conclusion on the major destructing mechanism of the target is drawn out: 12MeV electron beam, which has strong penetration ability, can heat the whole target almost at the same time. The expansion of the center part of the target is constrained by the boundary which results in two shock waves with most destructive power produced in the two sides of center. After the shock waves reach the free surfaces of the target, by wave reflection, two rarefaction waves will propagate inward, then symmetric tearing happens when the two waves meet at the center region of the target.

Key words electron beam, bremsstrahlung target, thermal shock wave, rarefaction wave, Monte-carlo

Received 26 June 2003, Revised 25 November 2003

* Supported by the Fundamental Research Foundation of National Defence Technology

1) E-mail: longjidong@tsinghua.org.cn