

4 MeV 闪光 X 光机轫致辐射靶设计*

何 辉, 禹海军, 王 毅, 戴文华

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 脉冲功率科学与技术重点实验室, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 对 4 MeV 闪光 X 光机的轫致辐射靶参数进行了设计和模拟计算。利用蒙特卡罗程序, 计算得到当轫致辐射靶的有效钽靶材厚度约为 0.6 mm 时, 靶正前方 1 m 处产生的单脉冲 X 光的照射量值最大, 可以达到约 2.86×10^{-3} C/kg, 满足 4 MeV 闪光 X 光机对其单脉冲 X 光的设计要求。对不同能量下的单脉冲电子束加载在轫致辐射靶上的能量沉积密度进行了计算和比较, 分析研究了不同结构下的靶破坏, 结果表明: 轫致辐射靶采用叠靶结构的钽靶能够满足 4 MeV 闪光机的实验需求。

关键词: 轫致辐射; 蒙特卡罗; 照射量; 能量沉积; 叠靶

中图分类号: TL53

文献标志码: A **doi:** 10.11884/HPLPB201931.190273

Design of bremsstrahlung target of 4 MeV flash X-ray machine

He Hui, Yu Haijun, Wang Yi, Dai Wenhua

(Key Laboratory of Pulsed Power Technology, Institute of Fluid Physics, CAEP, P.O.Box 919-106, Mianyang 621900, China)

Abstract: Bremsstrahlung converter target is one of the key factors for flash X-ray machine. The bremsstrahlung radiation process in which the electron beam impinges on the target is simulated utilizing the Monte Carlo method, by which the influence of the effective target thickness on the exposure is analyzed, the optimal target thickness and the exposure are also obtained for the 4 MeV flash X-ray machine. The damages of target impacted by the electron beam are compared and discussed for various electron energy deposit density from different sources, such as 12 MeV LIA, Dragon accelerators and 4 MeV flash X-ray machine. The results show that the tantalum distributed target may be the satisfactory solution for the bremsstrahlung target of 4 MeV flash X-ray machine.

Key words: bremsstrahlung; Monte Carlo; exposure; energy deposit; distributed target

PACS: 29.20.Ej; 52.57.Bc; 87.55.K-

4 MeV 闪光 X 光机是一台计划研制的、能量为 4 MeV、电子束流 2~2.5 kA、脉宽 60 ns(FWHM)的三脉冲直线感应加速器。该加速器产生的三脉冲电子束被传输聚焦后, 与高原子序数的材料作用发生轫致辐射而产生 X 光。该 X 光可以应用于闪光照相实验, 也可被广泛应用于研究冲击加载下物质结构的瞬态现象, 如装备物理中的微喷现象、航天飞行器的防护系统等^[1-3]。X 光的性能优劣, 除与加速器产生的电子束品质有关外, 还与轫致辐射靶的设计有直接关系。X 光产额与靶原子序数成正比, 一般采用高原子序数的材料作为轫致辐射靶材, 用以产生高产额的 X 光。常用的靶材料主要有钽、钨等, 考虑到两种材料的物理特性以及国内强流直线感应加速器的实际应用, 以钽材料作为轫致辐射靶材为最佳选择^[4]。另外, 在脉冲电子束和轫致辐射靶材相互作用过程中, 轫致辐射靶光子的产生和损耗两种机制都在同时发生, 因此, 对于一定入射能量的电子束存在具有最大转换效率的靶材厚度。此外, 由于电子束在轫致辐射靶上的不同能量密度沉积所造成的靶材破坏亦不相同, 也需要设计合适的轫致辐射靶结构来抑制电子束对靶材的破坏。本文介绍 4 MeV 闪光 X 光机的轫致辐射靶设计, 计算得到了轫致辐射靶的最佳靶材厚度及对应产生的 X 光照射量, 并对不同能量密度下轫致辐射靶的损伤破坏进行分析比较。

1 轫致辐射靶设计

4 MeV 闪光 X 光机计划产生三脉冲的 X 光, 它是通过直线感应加速器产生三脉冲的强流电子束与轫致辐射靶材作用后产生三脉冲 X 光, 其中单个脉冲电子束的设计参数为: 能量 4 MeV、电子束流强 2~2.5 kA、脉宽 60 ns

* 收稿日期: 2019-07-23; 修订日期: 2019-11-06

基金项目: 国防科技基础研究基金项目

作者简介: 何 辉(1969—), 男, 本科, 从事直线感应加速器研究; 1624496919@qq.com。

通信作者: 禹海军(1970—), 男, 硕士, 副研究员, 从事强流电子束与物质相互作用研究; caepyhj@163.com。

(FWHM)。对于每一脉冲电子束,其与韧致辐射靶材作用后,部分电子束以反射、透射方式出射出去;部分电子束进入靶内与靶原子材料相互作用,受到靶原子核库仑场的减速作用发生韧致辐射而辐射产生 X 光,同时部分电子束能量会沉积到韧致辐射靶内,导致靶材本身受到破坏。因此对于 4 MeV 闪光 X 光机韧致辐射靶的设计需要考虑靶材厚度、靶结构以及靶材破坏等关键因素,而对于靶材料来说,一般采用高原子序数的钨材。另外,由于靶材料厚度对 X 光产额的影响,即随着靶材料厚度的增加, X 光产额会增加,但同时靶材本身对 X 光子的衰减也会增强,因此亦需要设计最佳厚度的韧致辐射靶以便得到最高的韧致辐射效率。

1.1 模拟计算方法

本文应用 MCNP 程序^[5]对加速器的电子束打靶产生 X 光的过程进行仿真模拟。韧致辐射光源的产生过程如图 1 所示,电子束与韧致辐射靶作用后辐射产生前冲性强的脉冲 X 光。

1.2 韧致辐射靶材厚度计算

美国圣地亚国家实验室使用 Martin 公式用于计算分析二极管型闪光机靶前一米处的照射量^[6]。对于一定加速电压下,单脉冲电子束在靶正前方 1 m 处所产生韧致辐射的照射量最大值为

$$X = 1.1 \times 10^{-3} I \tau W^{2.8} \quad (1)$$

式中: X 为照射量(单位为 R); I 为电子束电流强度(单位为 kA); τ 为电子束脉宽(ns); W 为电子能量(单位为 MeV)。

照射量定义是在标准状态(温度 273 K, 101.325 kPa)下,在单位质量空气中由光子所产生的单种电荷电量总和。X 射线的照射量与光子能通量有着密切关系,一般定义辐射光子能通量与照射量的比值为照射量转换因子(ϵ)。对于光子能量大于 0.5 MeV 时,照射量转换因子随光子能量的增加而增大,对于某一光子能量,照射量转换因子是确定的,表 1 为照射量转换因子的能量依赖关系^[6],其中 $h\nu$ 表示的是光子能量。

由于不同厚度的韧致辐射靶产生的 X 光照射量随着靶材厚度的增加而成非线性变化,利用 MCNP 程序模拟得到电子束能量为 4 MeV、X 光焦斑为设计值 2 mm(FWHM)、钨靶材厚度从 0.01 mm 逐步增加到 1.4 mm,光子辐射角为 0° 角下辐射产生的光子能通量的变化情况。根据表 1 中的照射量转换因子的依赖关系从而可以得到不同厚度下的韧致辐射靶产生的 X 光照射量在靶前方 1 m 处的最大值,对照射量的变化情况进行归一化处理得到图 2 所示的变化曲线。图 2 表明,当靶材厚度 d 约为 0.6 mm 时,能量为 4 MeV 的单脉冲电子束在靶正前方 1 m 处韧致辐射产生的 X 光照射量最大。另外,也计算得到了在钨靶厚度 d 为 0.6 mm 时靶正前方 1 m 处归一化的光通量随 X 光出射角的变化(图 3),这表明产生的 X 光前冲性很好, 0° 角产生的 X 光光通量最大,且随角度的增大而逐渐降低。

1.3 单脉冲下靶正前方 1 m 处的 X 光照射量

4 MeV 闪光 X 光机要求产生 3 个具有相同性能参数的 X 光,对于每一束 X 光脉冲来说,利用蒙特卡罗模拟计算结果,可以得到单脉冲电子束作用下靶正前方 1 m 处韧致辐射照射量的最大值。另外,利用 Martin 经验公式(1)也可以计算得到靶正前方 1 m 处的 X 光照射量。表 2 为 MCNP 数值模拟结果和利用 Martin 公式得到的结果比较,数据表明,两种方法得到的结果均可以满足 4 MeV 闪光 X 光机的单脉冲设计指标要求(靶正前方 1 m 处不小于 1.55×10^{-3} C/kg)。

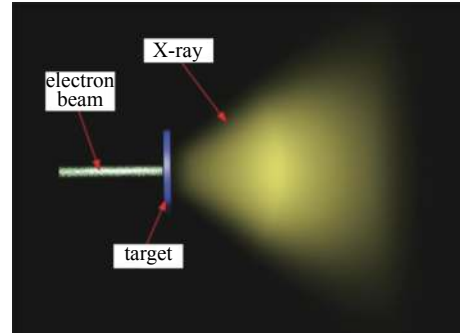


Fig. 1 Generation of the bremsstrahlung radiation X ray

图 1 韧致辐射产生 X 光示意图

表 1 照射量转换因子的能量依赖关系

Table 1 Exposure conversion factor change with photon energy

$h\nu/\text{MeV}$	$\epsilon / (\text{J} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{R}^{-1})$
0.01	0.019
0.02	0.171
0.05	2.151
0.1	3.847
0.2	3.294
0.5	2.940
1	3.140
2	3.731
3	4.258
4	4.668
5	4.960
6	5.291
8	5.706
10	5.979
15	6.419
20	6.364

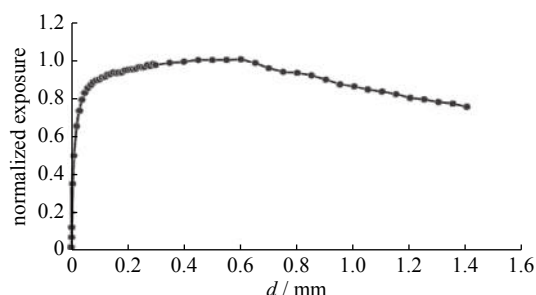


Fig. 2 Curve of normalized X ray exposure versus tantalum thickness

图2 归一化 X 光照射量随钽靶厚度的变化曲线

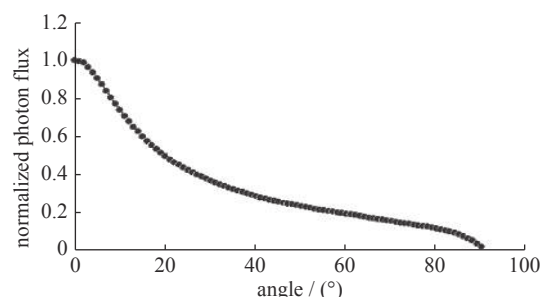


Fig. 3 Curve of normalized photon flux versus radiation angle for 0.6 mm tantalum target

图3 0.6 mm 钽靶产生的归一化光通量随辐射角分布

表 2 单脉冲电子束作用下靶正前方 1 m 处 X 光照射量比较

Table 2 Comparison of X ray exposure at 1 m just in front of the target impacted by the single pulse electron beam

methods	W/MeV	I/kA	τ/ns	$X/(\text{C}\cdot\text{kg}^{-1})$
Martin formula	4	2.5	60	2.07×10^{-3}
MCNP simulation	4	2.5	60	2.86×10^{-3}

2 轫致辐射靶结构与破坏分析

强流直线感应加速器产生的电子束与轫致辐射靶相互作用后,电子能量部分被转换为 X 光能,部分沉积在轫致辐射靶内,这部分能量沉积会造成靶材的损伤与破坏。靶材的受破坏程度与入射电子束的能量密度直接相关,这包括电子束流强大小、脉宽、入射束斑等因素。根据国内强流直线感应加速器的研究及实验结果^[7-8],采用叠靶结构可以降低电子束在轫致辐射转换靶的能量沉积密度,能够有效减小对轫致辐射靶的破坏,同时降低由于靶材破坏带来的回流颗粒问题^[9];另外,模拟计算和实验测量结果也表明,相同有效靶材厚度的叠靶和实心钽靶产生的 X 光照射量的大小和分布基本相同^[6,10-11]。

对于三脉冲的 4 MeV 闪光 X 机,由于其单脉冲电子束的参数、单脉冲的 X 光品质(照射量和焦斑)等与已有直线感应加速器的电子束参数都不相同,因此电子束对轫致辐射靶作用后造成的靶破坏及影响亦会不同。考虑到 4 MeV 闪光 X 机的设计指标,通过比较、分析国内强流直线感应加速器^[12-13]的轫致辐射靶破坏情况,可以预估 4 MeV 闪光 X 光机的轫致辐射靶的破坏情况,如表 3 所示,其中 D 为靶面上的能量沉积密度(单位 J/mm^2)。

表 3 单脉冲电子束作用下不同轫致辐射靶的破坏比较

Table 3 Comparison of damage for different bremsstrahlung targets impacted by single pulse electron beam

	W/MeV	I/kA	τ/ns	X-ray spot/mm	$D/(\text{J}\cdot\text{mm}^{-2})$	target structure	target destroyed
12 MeV LIA	12	2.5	80	3.2	298.6	slab	melting ablation/perforation
						distributed	no change
Dragon- I	20	2.0	60	1.5	1358.8	distributed	perforation
Dragon- II	20	2.0	60	2	764.3	distributed	perforation
4 MeV X-ray machine	4	2.0~2.5	60	2	152.9~191.1	distributed	no transformation (estimated)

另外,图 4~图 6 分别给出了部分强流直线感应加速器的轫致辐射靶破坏示意图。

表 3 的计算与实验结果表明,由于神龙一号和神龙二号加速器产生的单脉冲电子束能量高、束流流强大以及与轫致辐射靶作用的束斑较小,因而在轫致辐射靶上的能量沉积密度较高,对靶材造成的破坏更剧烈,即使采用叠靶结构来减缓靶材料的损毁,仍然会导致靶材的毁伤、飞溅、穿孔等现象的发生,并向加速器前端回流靶材金属颗粒,影响加速器性能^[14];而对于 12 MeV LIA,由于在轫致辐射靶上的电子束能量沉积密度相对于上述两者大大减小,在采用实心钽靶时仍然会造成靶材料的烧蚀、穿孔,而采用钽叠靶结构时没有造成靶材的损伤。对比 4 MeV 闪光 X 光机的单脉冲电子束作用在轫致辐射靶上的能量沉积密度,大幅小于 12 MeV LIA 电子束在靶上产生的能量沉积密度,因此,对于 4 MeV 闪光 X 光机来说,轫致辐射靶采用叠靶结构情况时,在单脉冲电子束的作用下不会



Fig. 4 Damage of different targets for 12 MeV LIA

图4 12 MeV LIA 不同结构靶破坏

导致靶材的破坏与穿孔等,不会产生类似神龙二号加速器靶材金属颗粒回流问题,同时为三脉冲电子束打靶产生三脉冲 X 光提供了保证,另外,这也有利于降低 4 MeV 闪光 X 光机的束流漂移段长度,从而降低该型闪光机的研发费用等。



Fig. 5 Damage of tantalum distributed target for Dragon- I accelerator

图5 神龙一号加速器钽叠靶破坏



Fig. 6 Damage of the tantalum distributed target impinged by different electron beams from Dragon- II accelerator

图6 不同脉冲作用下的神龙二号加速器钽叠靶的破坏

3 结论

对能量为 4 MeV 的闪光 X 光机的韧致辐射靶进行了物理设计和数值模拟计算。当韧致辐射靶采用有效厚度为 0.6 mm 的钽材时,可以在韧致辐射靶正前方 1 m 处获得最大的 X 光照射量;利用经验公式 Martin 公式和 MCNP 模拟计算,得到的 X 光照射量大小满足或超过该闪光 X 光机的设计指标。对单脉冲电子束作用后不同能量密度沉积下的韧致辐射靶的破坏进行了比较和分析,表明韧致辐射靶采用钽叠靶结构设计能够满足 4 MeV 闪光 X 光机的多脉冲打靶要求,但最终设计结果需要进行实验验证。

致谢 感谢神龙系列加速器运行人员在加速器实验上的支持和帮助。

参考文献:

- [1] 马勋,邓建军,姜萍,等.流体动力学实验用闪光X光机研究进展[J].强激光与粒子束,2014,26:010201.(Ma Xun, Deng Jianjun, Jiang Ping, et al. Review of flash X-ray generator applied to hydrokinetical experiments. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26: 010201)
- [2] 叶雁,李泽仁,祁双喜,等.美国次临界实验中X光照相应应用综述[J].高能密度物理,2009(4):177-181.(Ye Yan, Li Zeren, Qi Shuangxi, et al. Review of flash radiography applications in America subcritical experiments. High Energy Density Physics, 2009(4): 177-181)
- [3] 张奇.闪光X射线技术在空间科学领域中的应用[J].环模技术,1999(3):54-58.(Zhang Qi. The application of flash radiography to space science and technology. Environment Technique, 1999(3): 54-58)
- [4] 禹海军,陈楠,李劲,等.神龙一号韧致辐射靶设计[J].高能密度物理,2007,3:93-96.(Yu Haijun, Chen Nan, Li Jin, et al. Design of bremsstrahlung target of Dragon- I. High Energy Density Physics, 2007, 3: 93-96)
- [5] 刘军,刘进,施将君,等.闪光照相中FXRMC和MCNP4B的散射比较研究[J].强激光与粒子束,2006,18(6):1014-1018.(Liu Jun, Liu Jin, Shi Jiangjun, et al. Scattering comparison between FXRMC and MCNP in flash X-ray radiography. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(6): 1014-1018)
- [6] 王毅,李勤,戴志勇.蒙特卡罗模拟分析电子束发射度对照射量空间分布影响[J].强激光与粒子束,2017,29:065006.(Wang Yi, Li Qin, Dai Zhiyong. Analysis on influence of beam emittance on spatial distribution of exposure using Monte Carlo simulation. High Power Laser and Particle Beams, 2017, 29:

065006)

- [7] 李劲, 张开志, 代志勇, 等. 神龙一号加速器调试[J]. 中国物理C, 2008, 32(S1): 247-249. (Li Jin, Zhang Kaizhi, Dai Zhiyong, et al. Commissioning of Dragon-I linear induction accelerator. Chinese Physics C, 2008, 32(S1): 247-249)
- [8] 石金水, 邓建军, 章林文, 等. 神龙二号加速器及其关键技术[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28: 010201. (Shi Jinshui, Deng Jianjun, Zhang Linwen, et al. Dragon-II accelerator and its key technology. High Power Laser and Particle Beams, 2016, 28: 010201)
- [9] 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 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)
- [10] 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 Haijun, Long Jidong, Li Qin, et al. Development of distributed target. High Power Laser and Particle Beams, 2002, 14(5): 797-800)
- [11] Yu H J, Zhu J, Chen N, et. al Numerical simulations and experiments of beam-target interaction for multipulse bremsstrahlung converter applications[J]. [Physical Review Special Topics – Accelerators and beams](#), 2012, 15: 060401.
- [12] 李勤, 石金水, 禹海军, 等. 狭缝法测量X射线斑点大小[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(10): 1691-1694. (Li Qin, Shi Jinshui, Yu Haijun, et al. Slit X-ray spot size measurement technique. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(10): 1691-1694)
- [13] 石金水, 丁伯南, 邓建军, 等. 12 MeV直线感应电子加速器[J]. 强激光与粒子束, 1997, 9(4): 599-604. (Shi Jinshui, Ding Bonan, Deng Jianjun, et al. 12 MeV linear induction electron accelerator. High Power Laser and Particle Beams, 1997, 9(4): 599-604)
- [14] 禹海军, 朱隽, 刘承俊, 等. X光转换靶区物理现象研究[J]. 高能量密度物理, 2010, 1: 1-4. (Yu Haijun, Zhu Jun, Liu Chengjun, et al. Develop of physical properties for X-ray converter target zone. High Energy Density Physics, 2010, 1: 1-4)