

厚靶韧致辐射特性的数值模拟研究^{*}

龙继东¹⁾ 石金水²⁾ 禹海军²⁾ 林郁正¹⁾

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 X 光机正朝高能强流方向发展. 这些装置中普遍采用 mm 厚度的重金属厚靶, 其辐射特性和各种参数间的规律受到关注. 本文采用基于蒙特卡罗法的 EGS4 程序比较全面的研究了高能 X 光机中所关心的靶厚度的选择、韧致辐射场的角分布和 X 射线能谱的规律. 同时还专门就 X 光强度和束流发射度、打靶焦斑尺寸三者的依赖关系进行分析, 结论表明针对现有的 X 光机参数, 不用担心因追求小焦斑而带来 X 光照射量的损失. 文中还分析了强束流条件下单粒子蒙特卡罗模拟程序的适用性. 文中结论和已有实验结果吻合, 对实际工作具有意义.

关键词 电子束 韧致辐射 厚靶 能谱 发射度

1 引言

X 光机早已被广泛应用于民用、国防等各个领域. 其目前正蓬勃发展的一个方向是提供高照射量, 光子平均能量 MeV 以上的硬 X 射线, 用于大型物品或是重金属以及高速运动物体的瞬态诊断, 如海关集装箱检测系统、工业 CT、大型闪光照相设备等. 这些装置中都是利用数个 MeV 到 20MeV 左右能量的电子束轰击 mm 厚度的重金属厚靶^[1]产生 X 光用于辐照成像. 产生的 X 光的照射量、角分布特点以及能谱与打靶电子束参数、靶厚度等参量间的关系都是非常关心的问题. 但这方面已有研究不多, 并且要想直接利用解析方法或是实验手段获得厚靶情况下韧致辐射能谱等细节以及众多参量间的依赖关系是非常困难的. 而在核物理中, 核事件的随机性使得采用蒙特卡罗方法的计算机模拟程序在该领域得到广泛的运用. 这些代码直接建立在光子、电子在物质中的相互作用的理论和实验的基础上, 模拟结果的准确性很高. EGS4^[2]就是其中一种, 其全名为 Electron-Gamma Shower, 它可以模拟在任何几何形状中, 能量

从几个 keV 到几个 TeV 的电子-光子簇射过程. 其元素和介质材料齐全, 可提供 100 种元素的截面数据, 并可以由用户自己生成混合物、化合物的截面数据; 而其开放式的结构和公开的源码使得用户可以深入学习物理机制以及蒙特卡罗程序的编写. 因此, 本文将建立模型, 利用 EGS4 比较全面的研究数个 MeV ~ 20MeV 电子束轰击厚靶的韧致辐射特性, 并和公开的实验结果进行对比和总结, 旨在提供一个较全面的厚靶条件下韧致辐射特性的参考. 其结论对于 X 光装置工作参数的选择、韧致辐射靶区的设计、最后的成像分析以及确定采用 EGS4 数值模拟这种方法本身在这个范围的适用性等都有重要的意义.

2 模型的建立

虽然各种 X 光机用途不同导致工作参数有所差异, 但大多存在一些共性: 通常转换靶的面积大于束靶作用点面积, 电子束轴垂直于靶表面; 靶为重金属类的钽、钨靶. 同时建立模型前还需要考虑靶材物理性质在束流轰击下随时间的改变以及强流束电荷间彼此影响. 理论分析认为靶辐射转换特性的变化

2004-04-07 收稿

* 国防科技基础研究项目资助

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

关键在于靶物质密度的改变,所以即使靶材被加热,甚至在电子束脉冲过后发生力学上的破坏,只要束脉冲持续期间靶材料密度变化小,就可以认为靶物理性质不变.而强流束电荷间的彼此影响可在电子的入射参数上体现,物理量束流发射度就包含了束电荷间的彼此影响;而一旦束流入射到靶内,其密度比金属靶内自由电子密度小很多,完全可以忽略束电荷间的彼此影响.因此可以用 EGS4 这类代码研究强流束打靶的情况.

基于上述分析,建立平面靶模型,该模型中假定靶前后都是真空,忽略靶径向尺寸对辐射场的影响,束轴垂直于靶表面.选择钽靶,并忽略钽靶物性随电子束入射时间的改变.

3 数值模拟及其结果分析

3.1 X 光强度随转换靶厚度的变化

在电子和靶相互作用过程中,韧致辐射光子的产生和损耗两种机制都在同时发生,因此存在一个对于给定能量的电子束具有最大转换效率的靶厚度,将该厚度定义为最佳厚度.而获得最佳的照相效果还和照相光场的均匀性、束流发射度、焦斑大小、背景散射等多种因素相关,因此如果知道 X 光产额随靶厚度变化的规律,就可以为了避免某些不利效应而折中的选择靶厚度,如为了减少透射电子或是提高 X 光能谱的硬度,靶的厚度就可以取厚一些.

图 1 描述了 0° 出射角附近归一化 X 光强度随厚度的变化,入射电子能量 20MeV.这里 X 光强度定义为距离靶点 1m 半径的球面法线方向每单位面积里通过的 X 光总能量,量纲 (MeV/m^2).从 X 光强度的

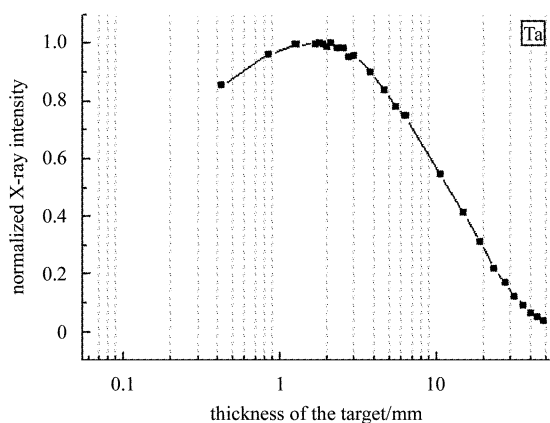


图 1 20MeV 电子入射时 0° 出射角附近的归一化 X 光强度随钽靶厚度的变化曲线

变化曲线看出 20MeV 对应的靶的最佳厚度约 2.1mm,且靶厚度围绕最佳厚度作微小变化时,X 光照射量变化很小.这个特性对于靶厚度的选择提供了余地,可以在保证 X 光强度的前提下,根据其他需要而选择偏薄或偏厚的靶.而实际使用中,用于辐射照相目的的大型 X 光机在这个能段里转换靶的厚度从 1—3mm 都有,正好证实了上述结论.

大型 X 光机的能量范围通常在 4—20MeV 这个能段.于是还模拟得到 4MeV,12MeV 入射电子对应的优化钽靶厚度分别为 0.6mm 和 1.2mm.因为已经知道 X 光强度对靶厚度变化并不敏感,所以可以简单的用上述 3 个已知值通过分段插值计算其他能量入射电子对应的钽靶最佳厚度,见公式(1):

$$d = \frac{3}{40}E + 0.3, [\text{mm}],$$

$$4\text{MeV} \leq E \leq 12\text{MeV}, \quad (1a)$$

$$d = \frac{9}{80}E - 0.15, [\text{mm}],$$

$$12\text{MeV} \leq E \leq 20\text{MeV}. \quad (1b)$$

3.2 X 光强度的角分布情况

韧致辐射 X 光的角分布情况也是辐射成像设备所关心的物理量.其对成像区的选择、辐射屏蔽、相关的仪器如 X 光准直体、射线屏蔽材料、射线探头等设备的放置提供指导.

为了对比,将模拟的结果和 L.H.Lanzl 的实验结果^[3]以及国内文献中常引用 Martin 公式^[4]计算结果共同绘制在图 2 上.需说明的是虽然实验条件和本文的模拟条件不同,但可从理论上预测模拟曲线应该在两条实验曲线之间.可以看到,20MeV 电子束垂直入射 2.0mm 钽靶的模拟结果和 17MeV 入射在 0.5mm 厚度的金靶上的 X 光强度角分布在 0° — 15° 范围是很接近的,而和 Martin 公式的计算结果差别较大.这里强调这种差别在光子出射角很小以及很大的时候特别明显.之所以强调这点是因为光子强度在小出射角范围的变化直接影响束流发射度和焦斑尺寸对靶正前方 X 光照射量的影响,这点后面章节就可以看到.由于 Martin 的原始文献中只提到该公式是综合一些文献数据得出,没有说明其公式应用条件和具体数据来源,使得 Martin 公式使用时一直存在疑问.综合本节工作以及文献[1,3,5]的结论,认为 Martin 公式是单个高斯函数曲线拟合结果,其结果在光子出射角 1° 左右时以及大角度情况下的准确性很差,同时初步判断该公式适用于厚度

0.1—0.3mm 的重金属靶.

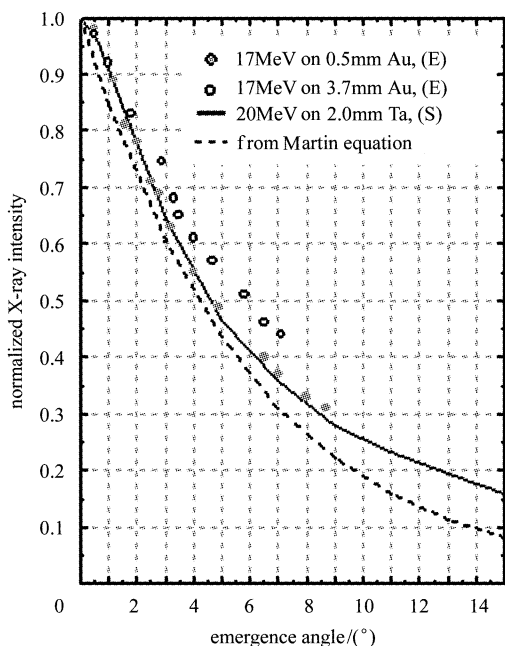


图 2 归一化 X 光强度沿发射角的变化曲线

对于 X 光角分布进一步研究还表明: 1) 在模拟条件下, 光子出射角 90° — 180° 范围, 也就是靶后方, X 光强度角分布比较均匀, 强度约是靶正前方 X 光强度的千分之一量级, 和 Martin J. Berger 等人得到的结果一致^[5]. 2) 当电子能量一定时, 随靶厚度的增加, 靶材原子序数上升, X 光角分布具有均化的趋势. 这是由于靶厚度增加以及重原子对电子的散射作用增强的结果.

3.3 轴线附近光子能谱

因为光子与物质的作用截面不仅和靶材有关, 还取决于光子能量. 因此光子能谱是反映其特性的一个关键参量. 但对于 MeV 以上能量的光子能谱测量很困难, 且韧致辐射光具有方向性, 不同发射角的光子能谱也不相同, 直接实验测韧致辐射谱的工作很困难, 而用蒙特卡罗方法来研究韧致辐射谱则相对容易很多. 首先模拟了 12MeV 和 20.9MeV 能量的两种电子入射产生的韧致辐射谱. 为证实模拟结果的准确性, 模拟条件同 A. A. O'Dell 等人所做的实验一致. 该实验原理是利用 5.3MeV 和 20.9MeV 的电子束轰击在 0.2 倍辐射长度厚金钨复合靶上产生光子, 然后经过厚 2.858cm (约 0.3 倍辐射长度) 的铝片过滤, 再去轰击重水靶产生光中子, 通过测得的光中子能谱以及光中子反应截面推算得到了靶后正前方的韧致辐射谱. 由于 $D(\gamma, n)p$ 反应的阈值是 2.23MeV, 测得的能谱从约 3MeV 开始, 并给出的不

确定度 5%—10%^[6]. 值得一提的是该实验直接得到光子的个数谱, 对成像分析很有意义.

由于辐射谱可参考的数据不多, 了解不深, 因此模拟中为避免非物理效应出现, 没采用减方差的技巧, 辐射谱统计不确定度上限 $\sim 8\%$. 将实验数据和模拟结果绘在图 3 中进行比较. 该图中纵坐标的单位是光子数/MeV/立体角/入射电子数. 可以看出模拟能谱和实测能谱形状很吻合.

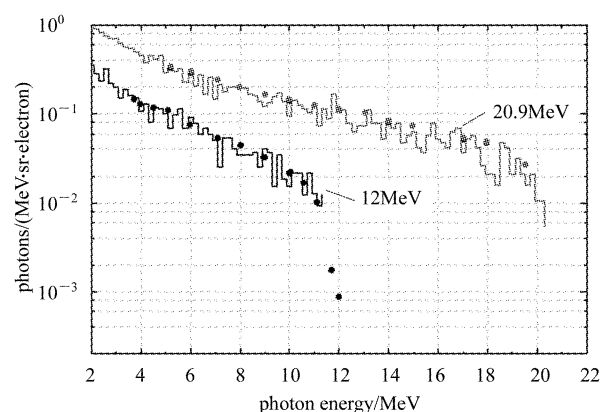


图 3 12MeV 和 20.9MeV 电子入射厚靶产生的韧致辐射谱模拟结果

图中实心数据点来自 O'Dell 的实验^[6]

在此基础上, 进一步模拟了 20MeV 动能电子垂直入射 1.4mm 钽靶时光子能谱随光子出射角的变化, 见图 4. 图上纵坐标代表光子出射角方向半径 1m 处单位球面上通过的归一化光子数. 可以看出随光子出射角增大, 韧致辐射谱谱形变化不大, 但谱强度下降很多, 对于 5MeV 能量的光子, 2° 出射角方向的谱强度约是 10° 出射角方向的 3 倍, 约是 20° 出射角

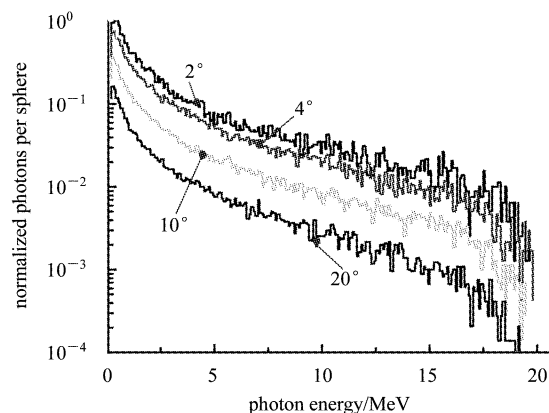


图 4 20MeV 电子垂直入射到 1.4mm 厚钽靶产生的韧致辐射能谱随光子出射角的变化

方向的 10 倍. 并且高能部分光子谱强度下降快于低能段光子. 这说明高能光子大多集中在小出射角

范围.从图上还可看出,尽管厚靶能谱随光子出射角变化,但其依赖性相对于薄靶条件^[1]小.这是由于厚靶对入射电子的散射和能量消耗不能忽略,使得不同出射角的光子能谱具有均化倾向.从这个角度来说,厚靶条件下更容易获得均匀的 X 光辐射场.

在能谱的基础上进一步得到结论:当入射电子能量在 2—24MeV 范围时,靶正前方 1m 处 0°出射角方向光子的平均能量约是入射电子能量的 1/5—1/6.以 12MeV 电子入射在 1.2mm 钽靶上的情况为例,模拟得到光子平均能量约 2.03MeV,而雷家荣等人^[7]用光子透射系数的迭代算法的实验也证实了光子平均能量为 2.01MeV.这说明模拟结果是准确可信的.

需要补充的是在 MeV 能量以上的 X 光机研究领域,通常光子平均能量按照入射电子能量的 1/3—1/5 估计.这样估计得到的光子平均能量是代表能够有效成像的光子的能量而不是产生的整个韧致辐射谱的光子平均能量.

3.4 束流发射度对轴线附近 X 光强度的影响

发射度是束流物理中一个很重要的物理量,不同加速器中关注它的原因有所不同.在 X 光机中关注发射度的主要原因是发射度是限制最小束斑的一个重要因素^[8].由于发射度和焦斑尺寸含有了入射电子入射位置和入射角信息,它们必然会影响到中心区域 X 光强度以及 X 光沿出射角的分布,因此需要知道这种影响的大小.

为了作定量比较,这里详细说明模拟条件.

在束流轴对称且电子不存在方位角方向运动的情况下,可以在柱坐标系 (r, θ, z) 下定义归一化均方根发射度

$$\epsilon_n = 2\beta\gamma \sqrt{\langle r^2 \rangle \langle r'^2 \rangle}, \quad (2)$$

式中 r' 代表 dr/dz , β 是电子速度与光速的比, γ 是相对论因子.

通常在 10MeV 能量以上强流 X 光机中测得的归一化 RMS 发射度 1000—3000 $\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$, 因此模拟选取发射度从 0—2400 $\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 变化.取电子能量 20MeV, 钽靶厚 1.4mm, 设束流相空间满足如下高斯分布,

$$\psi(r, r') = \frac{1}{2\pi \sqrt{\langle r^2 \rangle \langle r'^2 \rangle}} \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{r^2}{\langle r^2 \rangle} + \frac{r'^2}{\langle r'^2 \rangle} \right)\right], \quad (3)$$

此分布对应的发射度相椭圆内的粒子约占整个相空

间粒子数的 63.2%. 定义随机变量 r 和 r' , 满足上述高斯分布, 且满足 $\beta\gamma \sqrt{\langle r^2 \rangle \langle r'^2 \rangle} = \epsilon/2$, 模拟不同发射度下变化 $\langle r^2 \rangle$ 引起的关注区域的 X 光强度变化. X 光强度定义为光子出射角 2°范围内, 距离靶 1m 处的能量通量, 并用零发射度下求得的最大值进行归一化. 模拟结果如图 5 所示. 得到结论: 在通常的发射度大小的条件下, 只有均方根半径小于 0.5mm 后 X 光强度才迅速下降, 其他情况下半径 ($< 5\text{mm}$ 范围内) 和发射度变化对 X 光强度影响很小. 这个结果和文献^[9, 10]的结论在数量上则相差很大. 该文中借助 2.1 节中提到的 Martin 公式^[4], 得到如下结果: 对于 2000 $\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 归一化发射度下的束流, 随着焦斑半径从 5mm 逐渐减小, X 光照射量(强度)先缓慢减小, 当焦斑半径小到 1mm 时, X 光照射量(强度)相比零发射度下求得的最大值下降了约 22%, 此后 X 光照射量随焦斑减小而迅速减小; 当束斑半径减小到 0.5mm 时 X 光照射量下降约 38%.

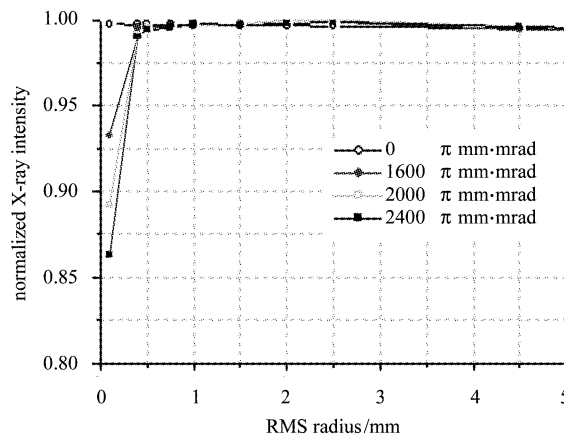


图 5 20MeV 电子束以不同发射度入射在 1.4mm 钽靶上, 产生的 X 光的照射量(0°出射角附近的)随束靶作用点均方根半径的变化曲线

由于当前国际上强流的 X 光机中焦斑直径正朝 1mm 方向缩小, 因此上述两不同结论对于 X 光机设计影响很大. 若按本文的结果, 则当前设计中基本无须考虑束流发射度和焦斑对靶正前方照射量的影响; 若遵照另一个结论, 则 X 光机中获得直径 1.5mm 以下的焦斑为保证靶正前方照射量的要求, 必须提高束流流强, 这对 X 光机阴极电子发射和靶的耐电子束轰击能力都提出更高的要求. 为了说清这个问题, 下面将比较发射度带来的入射散角和靶对电子散射引起的散角增加两者间的大小, 作进一步半定量分析.

对于归一化 RMS 发射度 $2000\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 的 20MeV 束流来说,当均方根半径 1mm 时入射散角均方根值约 25mrad ;均方根半径 0.5mm 时入射散角均方根值约 50mrad .可以说电子基本仍是垂直入射靶面,直观上认为照射量不应该下降太多;而另一方面,电子束穿越靶材会被散射,引起散角均方根增加.可利用公式(4)^[11]计算靶材散射带来的电子的散角增加.

$$\theta_0 = \frac{13.6\text{MeV}}{\beta c P} \sqrt{x} [1 + 0.038 \ln x], \quad (4)$$

这里 c, P, x 分别代表光速,电子动量,箔膜厚度(该厚度用辐射长度^[12]的倍数表示), θ_0 代表电子束穿过厚度 x 的物质后散角增量的均方根值(该散角是空间散射角在经过束流轴线的平面上的投影角).当 $0.001 \leq x \leq 100$ 时,结果不确定度小于 11% .

当钽片厚度为 0.04mm 时可得到散角均方根值约为 50mrad .很明显,通常情况下发射度带来的入射散角比厚靶引发的散角增量要小不少.建立模型,如下分析:

设钽靶由两层钽片组成,分别厚 0.04mm 和 1.4mm .让 20MeV 束流先垂直入射在 0.04mm 厚钽箔上,焦斑均方根半径 0.5mm ,然后再穿过 1.4mm 钽片.也就是发射度为 0 的束流以焦斑半径 0.5mm 轰击在 1.44mm 厚的钽靶上产生的 X 光场可以等效为发射度为 $2000\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 的束流以同样焦斑半径轰击在 1.4mm 厚的钽靶上产生的 X 光场.

从前面图 1 中不难得出束流垂直入射到 1.44mm 厚钽靶上在靶正前方产生的 X 光强度和入射在 1.4mm 厚钽靶的情况基本一致.于是可以得出:当束流以焦斑半径 0.5mm 大小打在 1.4mm 钽靶上时,发射度从 0 增加到 $2000\pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$,靶正前方

X 光强度变化不大.因此认为本文的结论在定量上更准确.推测造成这种差异的原因主要有两点:1) Martin 公式的角分布随出射角增加下降很快,尤其是小角度时,和模拟以及已有实验数据差异较大.2) Martin 公式没有考虑靶厚度对角分布的影响,并且当电子以一定角度斜入射靶表面时,其穿过的路程是大于靶厚度的,受到靶材原子散射更多,按 2.2 节结论,X 光强角分布更均匀,这样折算到束轴线上 0° 光子出射角方向的 X 光强度就比原 Martin 公式的值大.

在中国工程物理研究院的 X 光机上改变焦斑,初步研究结果证实了本文的观点.

4 结论

本文主要研究了厚靶的韧致辐射特征,得到如下一些结果:(1)存在靶最佳厚度,该厚度下 X 光转换效率最高,且当靶厚度围绕最佳厚度微小变化时,对 X 光产额影响很小.(2)得到 X 光强度角分布情况,并和实验数据吻合;同时得出 Martin 公式描述的 X 光强度随光子出射角的变化在小角度时不准确,并初步判断了 Martin 公式的适用条件.(3)得到 12MeV 和 20.9MeV 入射电子产生的韧致辐射谱,并和 O'Dell 等人实验结果吻合.(4)得到 20MeV 电子打靶产生的韧致辐射谱随光子出射角的变化规律.(5)确定辐射光子平均能量约为入射电子能量的 $1/5 \sim 1/6$,这和无损检测时采用的光子有效能量不同.(6)束流发射度和打靶焦斑尺寸对辐射场照射量大小和角分布有影响,但在通常的强流高能 X 光机的参数范围里,在追求小焦斑点光源的时候不用担心由此带来的 X 光照射量的下降.

参考文献 (References)

- Koch H W, Motz J W. Rev. Mod. Phys., 1959, **31**(4): 920—955
- Nelson W R et al. SLAC-265, UC-32(E/L/A), 1985
- Lanzl L H, Hanson A O. Phys. Rev., 1951, **83**(5): 959—974
- Martin T H. A Computerized Method of Predicting Electron Beam Bremsstrahlung Radiation with Specific Application to High Voltage Flash X-Ray Machines, In: SC-RR-69-241, 1969
- Berger M J, Seltzer S M. Phys. Rev., 1970, **C2**(2): 621—631
- O'Dell A A et al. Nucl. Instrum. Methods, 1968, **61**: 340—346
- LEI J R, CUI G X. Experimental Determination of Brems-spectrum for 12MeV X-Ray Equipment, In: GF Report: A0045385G, 2001(in Chinese)
- 雷家荣, 崔高显. $10\text{—}12\text{MeV}$ X 射线装置韧致辐射谱的实验测定, GF 报告: A0045385G, 2001)
- Lawson J D. The Physics of Charged-Particle Beams. Charendon: Oxford, 1977
- SHI J J, LI X W, LIU J. High Power Laser and Particle Beams, 1998, **10**(1): 108—112 (in Chinese)
(施将君, 李献文, 刘军. 强激光与粒子束, 1998, **10**(1): 108—112)
- SHI J J. High Power Laser and Particle Beams, 1995, **7**(4): 613—618 (in Chinese)
(施将君. 强激光与粒子束, 1995, **7**(4): 613—618)
- Groom D E, Klein S R. European Physical Journal, 2000, **C15**(1): 163—173
- Tsai Y S. Rev. Mod. Phys., 1974, **46**: 815

Bremsstrahlung Characteristics of Thick-Target Applied in High Energy X-Ray Facility^{*}

LONG Ji-Dong¹⁾ SHI Jin-Shui² YU Hai-Jun² LIN Yu-Zheng¹

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

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

Abstract Variety of X-ray facilities are widely used in many fields. One of its developing trend is to gain harder and more intense X-rays which are yielded by electron beam with energy above 10MeV and current above kA impacting on thick-target. Dependence of bremsstrahlung characteristics on beam parameters and target thickness are much concerned. The paper studies the selection of the thickness of the target, the bremsstrahlung photons intensity distribution along emergence angle as well as the bremsstrahlung energy spectra. Also, the dependence of X-ray intensity on beam emittance and size of beam-target interaction spot is given. The result reveals at the usual emittance, the decreasing rate of the X-ray intensity with decreasing spot size is much slower than that claimed by other references. The consistency between the simulation with experimental results shows that the EGS4 codes can be effectively used in High Energy X-ray facility study.

Key words electron beam, bremsstrahlung, thick-target, spectra, emittance

Received 7 April 2004

^{*} Supported by Fundamental Research Foundation of National Defence Technology

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