

高能电子束韧致辐射特性的理论研究

魏熙晔^{1)†} 李泉凤²⁾ 严慧勇²⁾

1) 中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 绵阳 621900)

2) 清华大学工程物理系, 北京 100084)

(2008 年 3 月 10 日收到, 2008 年 7 月 18 日收到修改稿)

高能电子束轰击金属靶会产生韧致辐射 X 射线, 为优化韧致辐射 X 射线品质, 需要研究如何获取最佳辐射效率等韧致辐射规律. 结合理论分析, 并采用 MCNP/4C 对 10, 20 MeV 电子的韧致辐射规律进行了模拟研究. 讨论了不同靶材料产生的韧致辐射效率、角分布、能谱分布、准直锥孔内辐射效率等问题. 通过对不同靶材料韧致辐射的模拟研究, 给出了不同厚度靶与光子效率、注量分布、出射电子与角分布的关系与规律. 由此得到不同靶材料对于 10, 20 MeV 电子在最优韧致辐射效率下的一些边界条件与规律.

关键词: 韧致辐射, 最佳效率, 角分布, 能谱

PACC: 2915D, 3480D, 3450B

1. 引 言

高能电子束轰击金属靶会发生韧致辐射, 产生 X 射线. 需要研究韧致辐射规律可改善韧致辐射 X 射线品质, 增加 X 射线转换效率, 同时减少出射电子与光中子的影响.

国内龙继东等^[1]进行了厚靶韧致辐射特性的数值模拟研究, 分析了 Ta, Au 靶选择厚度、韧致辐射角分布与能谱规律. 张松柏等^[2]利用衰减法测量了 6 MeV 医用电子直线加速器韧致辐射谱, 并与 EGS4 计算结果进行了比较. 徐妙华等^[3]利用 MCNP 程序, 讨论了利用韧致辐射诊断激光等离子体产生的超热电子的可行性. Tseng, Pratt 和 Lee^[4]定义了韧致辐射角分布函数, 利用数值计算方法对低 Z 和高 Z 靶物质的韧致辐射角分布规律进行了验证. Selzer 和 Berger^[5]对 20 MeV (大于光核反应阈值能量) 的电子束入射到 Ta, W 的厚靶上产生的光中子产额进行了蒙特卡罗模拟. Martin 和 Stephen^[6]对高能电子束在 W, Ta 靶产生的韧致辐射效率、角分布、能谱、能量沉积与光中子产额进行了蒙特卡罗模拟及其实验比较. Lynn, Quarles 和 Pratt^[8]给出了 $1 \leq Z \leq 92$ 的靶物质的韧致辐射角分布函数. Stritt 等^[8]对 10 MeV 电子束产生的韧致辐射进行了直接测量和蒙特卡罗模拟, 实验在 Ghent 大学的 15 MeV 电子直线加速器上

进行, 利用 Ge 探测器测量了三个不同角度的辐射光子.

目前, 尚未见对各种常用靶的韧致辐射主要特性进行系统性研究的文献. 本文结合理论分析, 采用 MCNP/4C 对常见的各种靶的韧致辐射主要特性进行了模拟研究. 该结果对于研究如何提高韧致辐射 X 射线的品质, 以及对于辐射防护与辐射场的精确测量都十分重要. 计算采用参数如下: 靶直径为 15 mm, 平行束流直径为 2 mm, 电子束能量分别取 10, 20 MeV.

2. 韧致辐射效率模型

2.1. 韧致辐射效率

入射到靶上的电子束通过电离(激发)过程和韧致辐射发生能量损失, 其中电离激发过程能量有极小部分转换为特征 X 射线, 大部分转换为热能. 电离与激发过程的碰撞阻止截面由 Bethe 给出, 而韧致辐射总截面由下式给出:

$$\Phi_{\text{rad}}(T_0) = \frac{1}{E_0} \int_0^{T_0} k \alpha(k, T_0) dk, \quad (1)$$

式中, Φ_{rad} 为总韧致辐射截面, T_0 为入射电子的总动能, E_0 为入射电子总能量, k 为韧致辐射光子能量, $\alpha(k, T_0)$ 为韧致辐射微观截面. $\sigma(k, T_0)$ 可通过电

† E-mail: weixiye@163.com

动力学与量子力学理论由不同近似条件给出的理论韧致辐射公式得到.

从入射电子的能量利用角度分析,韧致辐射效率可表征为

$$v_p = \sum_{i=1}^L E_{pi} / T_0 \quad (2)$$

式中, v_p 为韧致辐射效率, L 为韧致辐射光子总数目, E_{pi} 为第 i 个光子的能量.

对于不同靶物质韧致辐射光子效率 v_p 随靶厚 t 变化规律如图 1 所示.

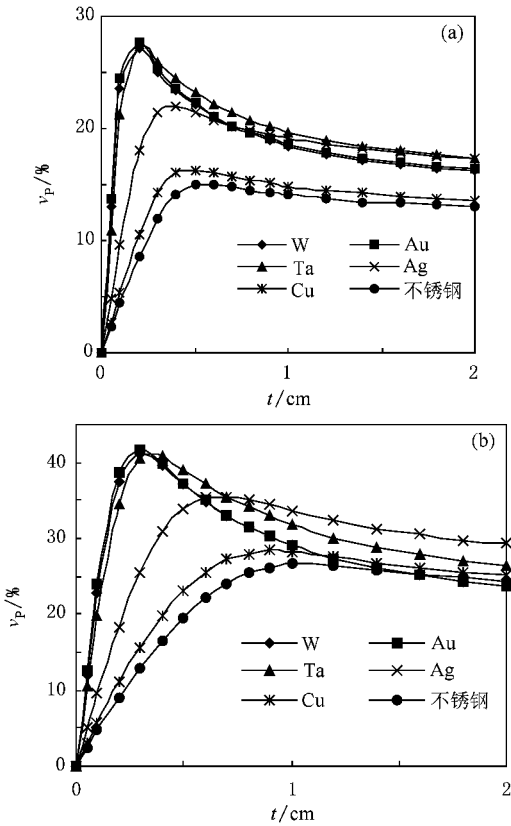


图 1 不同靶材料韧致辐射效率随靶厚变化规律 (a) 10 MeV 电子束 (b) 20 MeV 电子束

不同靶物质归一化的单个垂直入射电子产生的韧致辐射光子数目随靶厚变化规律如图 2 所示.

由图 1 知,原子序数 Z 较高的 W, Au, Ta 具有相对较高的韧致辐射效率;图 2 显示韧致辐射产生的光子数目基本与韧致辐射效率曲线对应,不同之处是韧致辐射效率曲线考虑了光子能量因素.韧致辐射效率与靶物质的平均射程有关,电子在靶物质的射程可表示为

$$r_0 = - \int_0^{T_0} \frac{dT}{\mathcal{L}(T)}, \quad (3)$$

式中, $\mathcal{L}(T) = dT/dx$ 为由于碰撞和韧致辐射引起

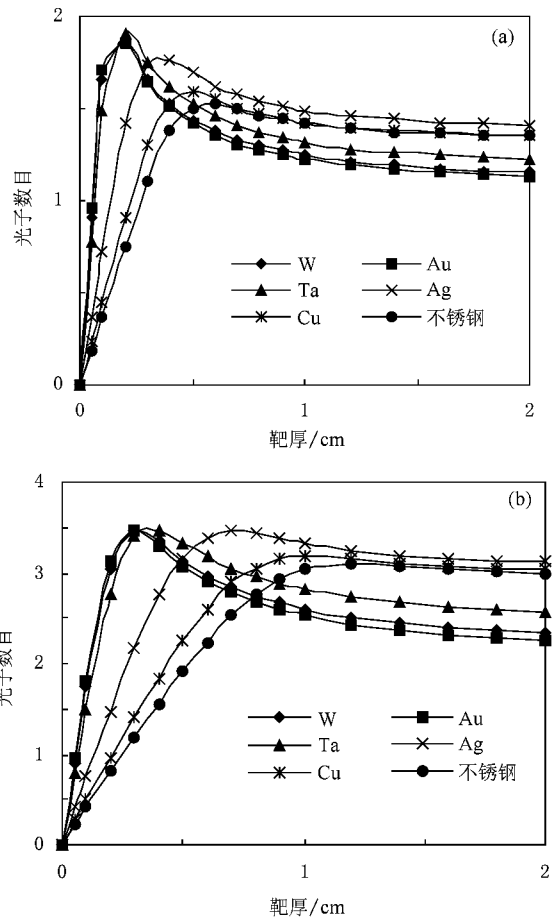


图 2 不同靶材料韧致辐射光子数目随靶厚变化规律 (a) 10 MeV 电子束 (b) 20 MeV 电子束

的能量损失率, x 为靶深度.

通过对 Cu, W 靶的平均射程相对 10, 20 MeV 电子束射程的分析,结合图 1 给出的结果,得到韧致辐射效率在靶厚约 $0.6r_0$ 时最大(电子能量高时该系数略大);而文献 [5] 给出了 W 靶对于入射电子为 2—60 MeV 的结果,总体是 $0.4r_0$ — $0.5r_0$ 时韧致辐射效率最大.本文计算结果与文献结果有一定差异,可能是采用截面数据有差异所致,而趋势十分相符.韧致辐射效率开始会随着靶厚度的增加会增大,但随着靶厚度进一步增加,产生的韧致辐射光子仅略微增加,而靶对光子的衰减(主要为光电效应、电子对效应、康普顿散射等)起较明显作用,会引起韧致辐射效率的降低.

2.2. 出射电子的影响

出射电子(也称“漏电子”)主要由电子经过靶产生的透射、反射及次级电子等组成,出射电子系数为

$$v_e = \sum_{i=1}^M E_{ei} / T_0, \quad (4)$$

式中, v_e 为出射电子产额, M 为出射电子总数, E_{ei} 为第 i 个出射电子的能量。

对于不同靶物质出射电子系数随靶厚 t 变化规律如图 3 所示。

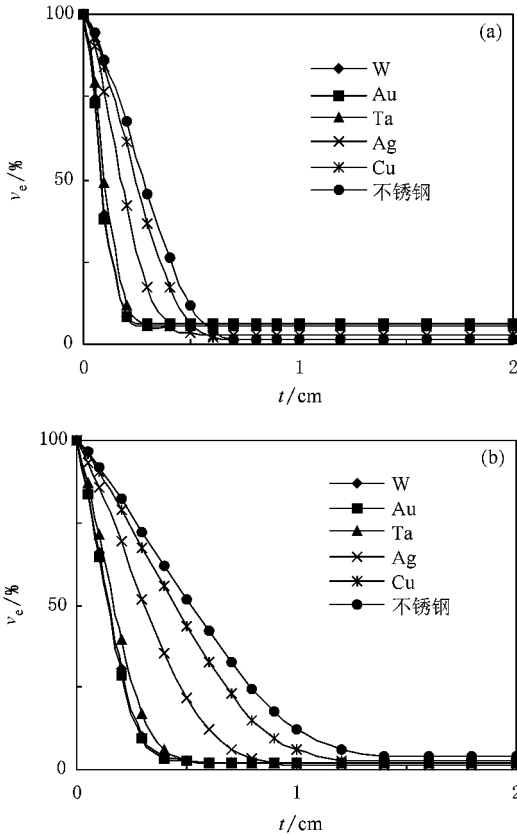


图 3 不同靶物质出射电子系数随靶厚变化 (a) 10 MeV 电子束 (b) 20 MeV 电子束

不同靶物质的单个垂直入射电子引起的出射电子数目随靶厚变化规律如图 4 所示。

由图 3 可见, 出射电子在能量更高时, 对于薄靶出射电子系数也更高。入射电子的动能会随靶厚增加而降低, 而单个入射电子(归一化)对于 Ag, Cu 与不锈钢在靶厚度很薄时释放电子数目略大于 1, 是由于 Ag, Cu 与不锈钢对于高能电子的阻止本领相对较弱, 因此靶很薄时入射电子基本穿透, 并且部分入射电子与靶物质作用产生次级电子(如与原子外层电子碰撞, 会产生 δ 电子), 使出射电子数目略大于入射电子数目, 但此后靶对电子的阻止作用明显, 出射电子数显著降低。Martin 等^[6]给出了 W 靶的出射电子数目结果, 与上述结果一致。

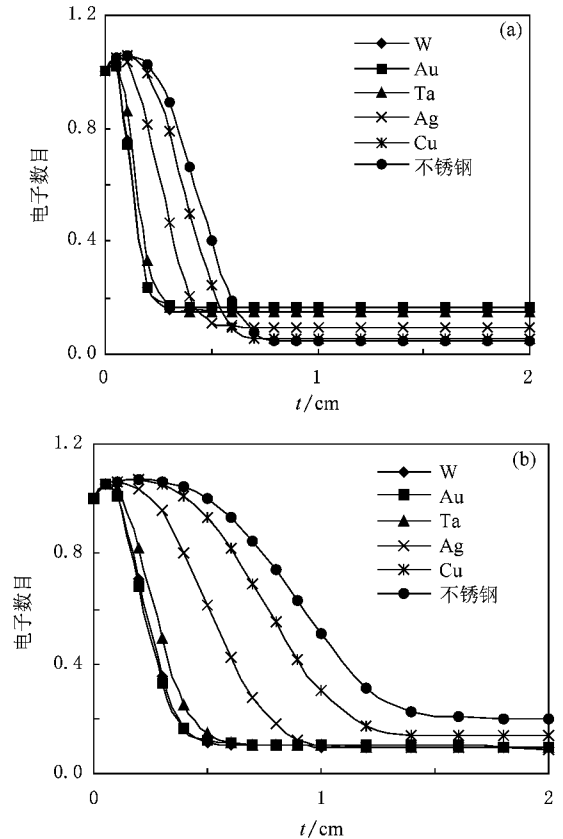


图 4 不同靶物质电子数目随靶厚变化 (a) 10 MeV 电子束, (b) 20 MeV 电子束

2.3. 光中子的影响

当电子能量低于 50 MeV 时, 光中子主要为巨共振核反应产生, 主要包括蒸发中子与直接中子(电子直接产生的中子可忽略)。韧致辐射产生的光中子输出可表征为

$$v_n = \sum_{i=1}^N E_{ni} / T_0, \quad (5)$$

式中, v_n 为光中子产额, N 为光中子总数, E_{ni} 为第 i 个光子的能量。

根据 Seltzer, Berger 对 Ta 和 W 靶光中子产额的研究表明, 对于 20, 10 MeV 的电子束, 每个入射电子的光中子产额量级分别为 10^{-5} , 10^{-3} 。

2.4. 韧致辐射最佳效率

综合考虑韧致辐射效率、出射电子和光中子的影响, 韧致辐射效率比可表征为

$$\eta = v_p (v_e + v_n). \quad (6)$$

对于不同靶物质韧致辐射效率比例系数随靶厚 t 变化规律如图 5 所示。由于光中子对于 20, 10 MeV

的电子束所占能量份额比较小,因此图 5 忽略了光
中子的影响.

认为此情况下靶厚最佳,10,20 MeV 的电子束对于
不同靶的最佳效率比时靶厚度列于表 1.

最佳效率为韧致辐射效率比例系数最大情况,

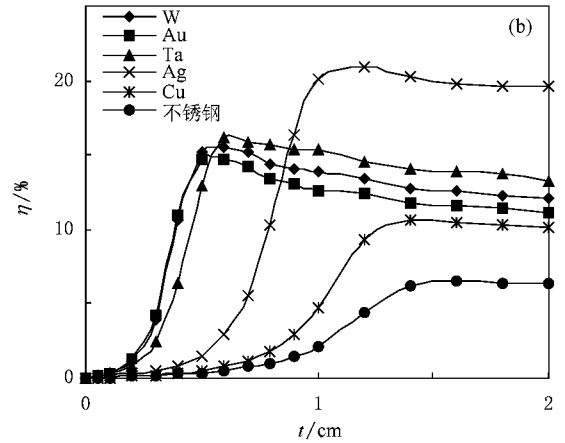
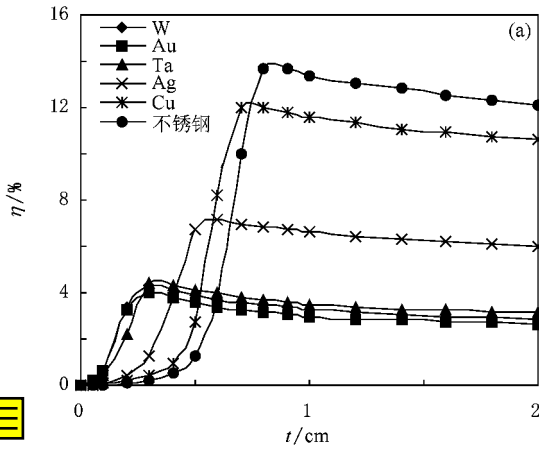


图 5 不同靶物质效率比随靶厚变化 (a) 10 MeV 电子束 (b) 20 MeV 电子束

表 1 最佳效率比下的靶厚度(单位:cm)

能量/MeV	W	Au	Ta	Cu	Ag	不锈钢
10	0.3	0.3	0.3	0.8	0.6	0.8
20	0.6	0.5	0.6	1.4	1.2	1.6

3. 韧致辐射角的分布

文献 4 定义的光子能谱的角分布可写成

$$S(T_0, k/T_0, Z, \theta) = \frac{d^2\sigma/dk d\Omega}{d\sigma/dk}, \quad (7)$$

式中, S 为光子归一化分布函数, k/T_0 为韧致辐射
能量损失(k)份额, θ 为出射光子与入射电子的角

度, σ 为韧致辐射截面, Ω 为立体角度. 通过 Born 近
似, 可得到

$$S = \frac{A}{4\pi(1 - \beta\cos\theta)^m} \sum_{i=0}^N B_i P_i(\cos\theta), \quad (8)$$

式中, β 为相对论常数, A, B 为拟合常数, 可查表获
得, $P_i(\cos\theta)$ 为 Legendre 多项式.

不同靶物质的光子注量率的角分布如图 6
所示.

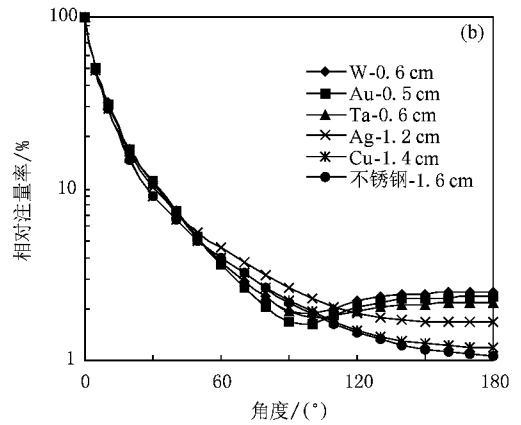
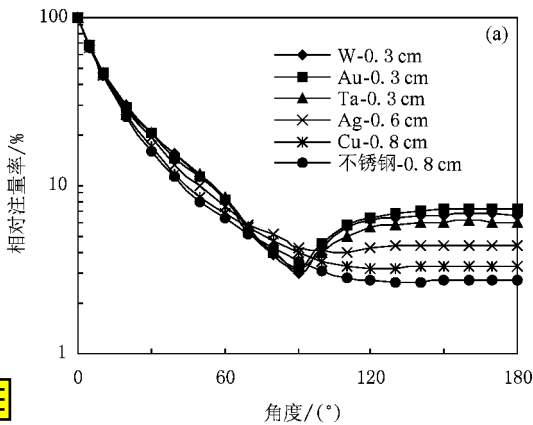


图 6 不同靶物质相对注量率角分布 (a) 10 MeV 电子束 (b) 20 MeV 电子束

不同靶物质的光子平均能量的角分布如图 7
所示.

韧致辐射具有方向依赖性, 随着电子能量的增
加, 具有更好的方向性. 研究表明, 韧致辐射对于低

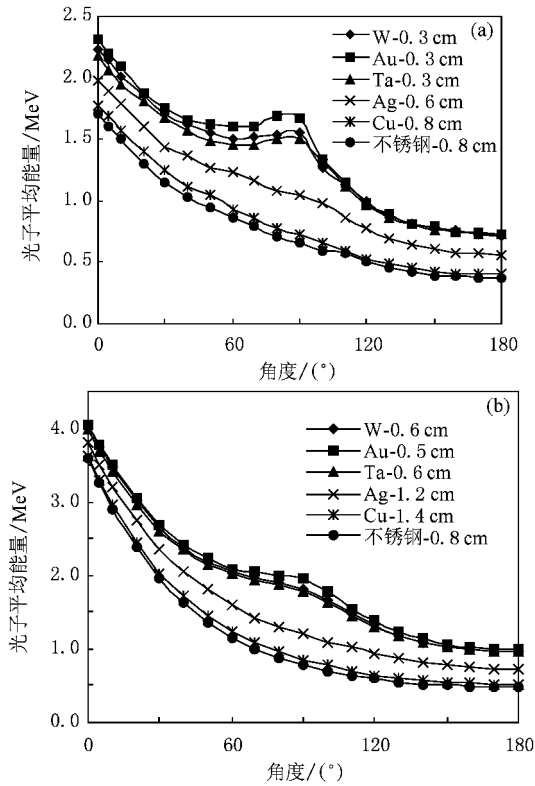


图7 不同靶物质平均能量随角分布变化 (a)10 MeV 电子束, (b)20 MeV 电子束

能、薄靶韧致辐射方向依赖性更为强烈,注量(剂量)随角度(与入射电子束动量方向的夹角)增大而迅速减少.当入射电子能量为 10^4 eV 量级时,韧致辐射注量随角度会出现先增加后减少的趋势.而对于高能电子束,主要趋势是注量随角度增加而下降;对于 W, Au, Ta 靶,在角度为 90° 时注量会出现突变,主要与光子的反射等有关,并由(8)式的系数 A, B_i 值决定的,这与文献[6]的结果一致.

4. 韧致辐射前向性特征

电子打靶后产生的韧致辐射光子束有较强的方向依赖性,实际应用中希望光子束有尽量好的前向性,准直锥孔内韧致辐射份额用光子前向性系数表示为

$$\xi_f = \frac{\sum_{i=1}^c E_{pi}}{\sum_{j=1}^L E_{pj}} \quad (9)$$

式中, c 为落在准直锥孔内的光子数目, L 为所有出射的光子数目.

不同靶物质前向性系数随靶厚变化如图8所示(30° 锥孔内).

立体角为 $\Omega = 2\pi(1 - \cos\theta/2)$, 30° 锥角对应的

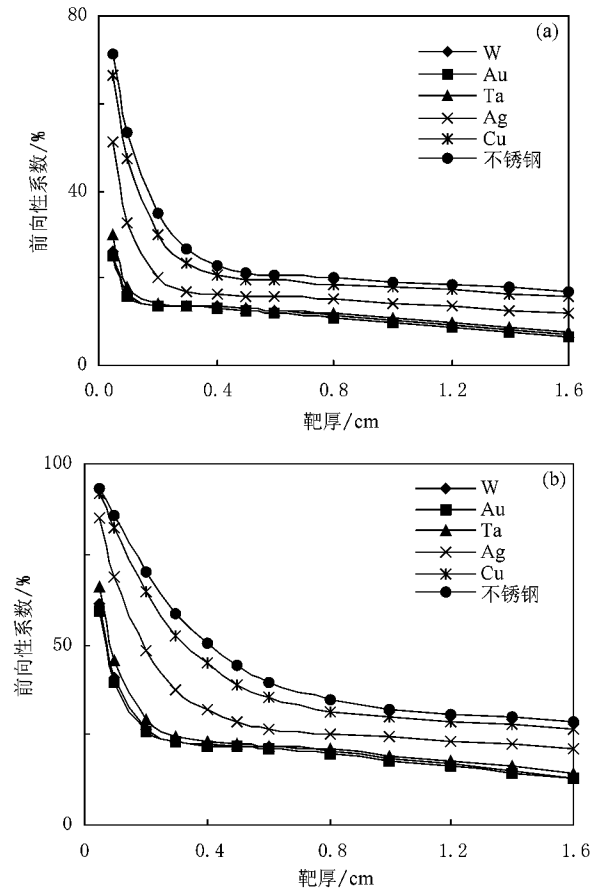


图8 不同靶物质前向性系数随靶厚变化 (a)10 MeV 电子束, (b)20 MeV 电子束

立体角为 1.70% . 电子束能量越高,光子的前向性越好,不锈钢、Cu 靶产生的韧致辐射光子具有更好的前向性.

5. 韧致辐射光子能谱分布

韧致辐射能谱为连续谱,随电子能量、入射角度和靶材料的不同而具有不同的谱分布.对于靶点正前方 1 m 位置的韧致辐射注量谱分布如图9所示.结果表明,韧致辐射光子平均能量并不是传统认为的入射电子能量的 $1/3$ 左右,实际谱线“偏软”(采用直角坐标结果十分明显).通过对不同方向角度能谱模拟表明,随着与入射电子方向的角度增加,韧致辐射能谱“趋软”,与图7结果一致.在 0.511 MeV 处,由于电子湮没现象,谱线存在明显能峰;同时在低能位置处,由于 K 壳层电离引起的特征 X 射线也会出现局部峰值(图中未给出).利用图9数据计算出的光子平均能量与文献[9]的计算结果(采用 EGS4 程序)基本一致.图10给出了韧致辐射能注量谱分布,

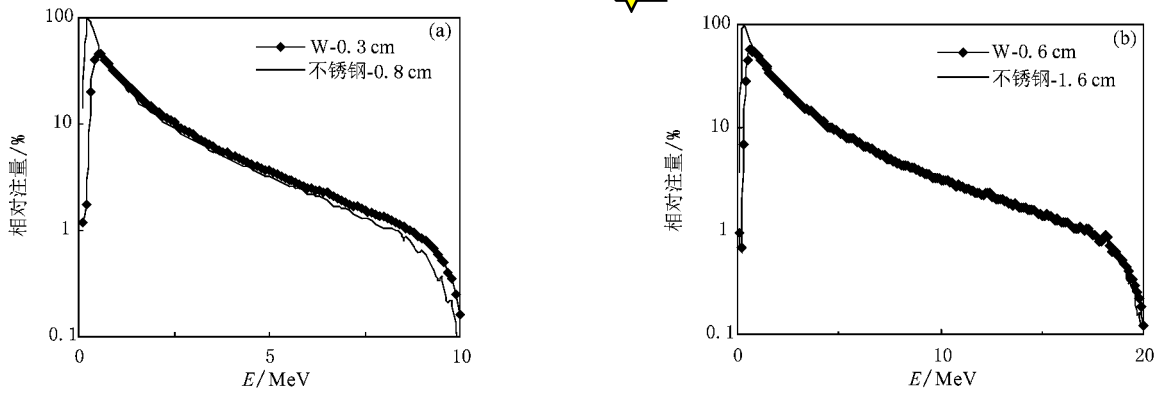


图 9 韧致辐射 X 射线剂量谱分布 (a) 10 MeV 电子束 (b) 20 MeV 电子束

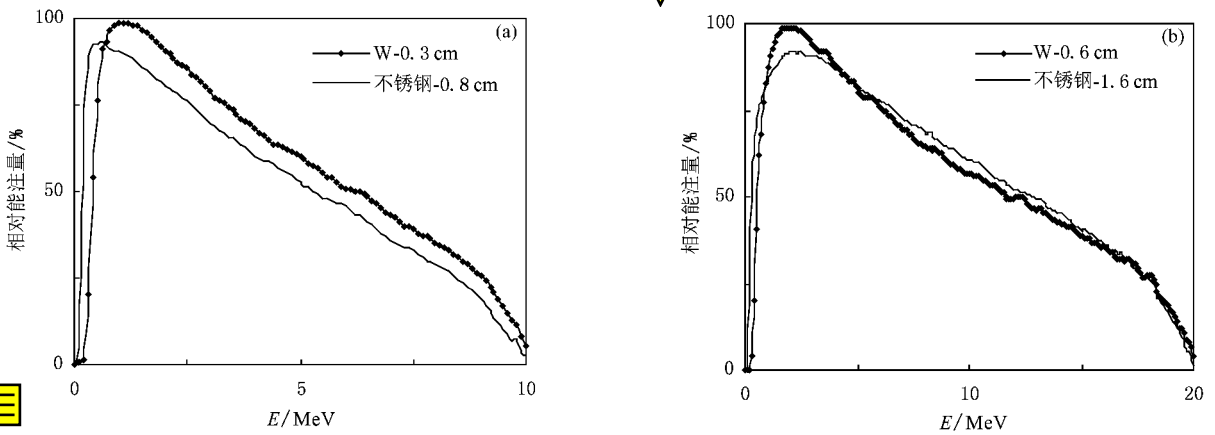


图 10 韧致辐射 X 射线能剂量谱分布 (a) 10 MeV 电子束 (b) 20 MeV 电子束

近似为“三角谱”,该结果与 Koch 和 Motz^[10]给出的 W 靶能剂量谱结果一致,光子有效能量(剂量子学意义的量,非平均能量)约为入射电子能量的 1/3,与实际情况相符。

6. 结 论

通过对不同材料韧致辐射的模拟研究的分析与讨论得出如下结论 (1) 电子束能量、靶材料、厚度直接影响光子效率、漏电子和能谱分布 (2) 原子序数和密度比较接近的 Au、Ta 和 W 的韧致辐射规律也比较相似,原子序数 Z 较高的靶具有相对较高的韧致辐射效率 (3) 不同能量电子的最优韧致辐射效

率与电子射程密切相关,实际韧致辐射的最优效率需综合考虑辐射效率与出射电子、光中子等影响; (4) 韧致辐射有较强的方向依赖性,对于高能电子束,总体趋势为剂量(剂量)是随角度增大(前向角度为 0°)而减少,而 W、Au、Ta 靶在角度为 90°时剂量会出现突变 (5) 电子束能量越高,韧致辐射光子前向性越好,不锈钢、Cu 靶具有相对较好的前向性 (6) 韧致辐射光子能剂量谱近似为“三角谱”,其剂量子学意义的有效能量一般取电子能量的 1/3,而光子平均能量则更低。

值得进一步研究的专题有电子射程、电子能量损失、束流参数、光中子影响定量分析、韧致辐射作用机制、复合靶、实验验证等。

[1] Long J D, Shi J S, Yu H J, Lin Y Z 2004 *High Ener. Phys. Nucl. Phys.* **28** 1238 (in Chinese) [龙继东、石金水、禹海军、林郁正 2004 高能物理与核物理 **28** 1238]

[2] Zhang S B, Huang F Z, Han S K, Zhao H B, Bao S L 2003 *At. Ener Sci. Tech.* **37** 206 (in Chinese) [张松柏、黄斐增、韩树奎、赵洪斌、包尚联 2003 原子能科学技术 **37** 206]

- [3] Xu M H , Liang T J , Zhang J 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 2357 (in Chinese) [徐妙华、梁天娇、张 杰 2006 *物理学报* **55** 2357]
- [4] Tseng H K , Pratt R H , Lee C M 1979 *Phys. Rev. A* **19** 187
- [5] Seltzer S M , Berger M J 1973 *Phys. Rev. C* **7** 858
- [6] Martin J B , Stephen M S 1970 *Phys. Rev. C* **2** 621
- [7] Lynn K , Quarles C A , Pratt R H 1983 *Atom. Data Nucl. Data Tables* **28** 381
- [8] Stritt N , Bertschy M , Jolie J , Mondelaers W 1996 *Nucl. Instr. Methods B* **113** 150
- [9] Long J D , Shi J S , Lin Y Z 2004 *Monte Carlo Method and its Application* **4** 125 (in Chinese) [龙继东、石金水、林郁正 2004 *蒙特卡罗方法及其应用* **4** 125]
- [10] Koch H W , Motz J W 1959 *Rev. Mod. Phys.* **31** 920

Theoretical study on bremsstrahlung of high energy electrons

Wei Xi-Ye^{1)†} Li Quan-Feng²⁾ Yan Hui-Yong²⁾

1) (Institute of Nuclear Physics and Chemistry , China Academy of Engineering Physics , Mianyang 621900 , China)

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

(Received 10 March 2008 ; revised manuscript received 18 July 2008)

Abstract

Bremsstrahlung will be produced when the metal target is bombarded by high energy electrons. Bremsstrahlung characteristics is discussed under the condition of optimal bremsstrahlung efficiency for the purpose of improving its quality. This paper simulates the bremsstrahlung characteristics , combining theoretical analysis with MCNP/4C program. Electron yield characteristics , photon yield of conic collimator , angular distributions and energy spectrum distributions are simulated for targets of different thickness and materials for 10 and 20 MeV electrons. The simulation results show that photon efficiency , emitted electron and photon flux distribution is related to material and thickness of the target. And the maximum photon yield of bremsstrahlung is mainly dependent on the electron energy range , and related to atomic number. Thus the relevant boundary conditions and characteristics are obtained under the optimal bremsstrahlung efficiency of different targets for 10 and 20 MeV electrons.

Keywords : bremsstrahlung , optimal efficiency angular distribution , energy spectrum

PACC : 2915D , 3480D , 3450B