

# 影响 X 光源特性的参数研究\*

刘 军<sup>1</sup> 崔 蔚<sup>2</sup> 施将君<sup>1</sup> 刘 进<sup>1</sup> 李必勇<sup>1</sup>

(1 中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

(2 中国工程物理研究院工学院计算机系, 四川 绵阳 621900)

**摘 要** 针对高能电子束撞击重金属靶产生韧致辐射光子, 利用蒙特卡罗方法详细研究了电子束半径与发射度以及靶的厚度对 X 光源特性的影响. 结果表明: 电子束半径与发射度不仅是影响照射量的主要因素, 也是造成照射量分布不均匀的主要原因; 给定电子束, 存在一个靶厚度使得靶前 1 m 处的照射量最大. 因此, 在 X 射线成像系统的设计和模拟过程中, 应综合考虑电子束半径与发射度和靶厚的影响.

**关键词** MC 模拟; 电子束参数; 转换靶; 照射量

**中图分类号** TN248.1

**文献标识码**

A

## 0 引言

电子加速器产生的高能电子束经磁场聚焦后撞击高 Z 靶产生的韧致辐射 X 光用于客体的 X 射线成像, 影响 X 射线成像品质的一个十分重要的因素就是 X 光源的尺寸及其光场均匀性. 光斑尺寸对 X 射线成像对比度有一定的影响<sup>[1,2]</sup>, 而光场均匀性直接影响我们对未知客体的正确认识. 另外, 由于图像接收设备的灵敏度限制, 要求光源强度越高越好. 因此, 在进行 X 射线成像时, 我们必须注意到光源尺寸、光源强度以及光场的均匀性.

关于电子束的半径和发射度对光源特性的影响, T. H. Martin 给出了理想情况下(电子束半径和发射度均为 0)靶正前方 1 m 处的照射量计算公式和电子束韧致辐射的归一角分布<sup>[3]</sup>; 施将君在实际电子束中每个样品电子的发射方向上采用 Martin 公式, 给出了电子束对靶正前方 1 m 处的照射量和电子束韧致辐射的归一角分布<sup>[4]</sup>; 在实际应用中, 往往不是从电子束的参数出发, 而是直接采用理想情况下的光源分布<sup>[5]</sup>. 这样做的结果与实际情况存在一定的偏差, 不能真实地反映击靶电子束参数对光源特性的影响. 本文将在不同的电子束半径和发射度下, 使用蒙特卡罗方法模拟击靶电子及其次级粒子在靶中的实际输运过程来得到靶前 1 m 处的照射量及其空间分布.

另外, 从定性分析看, 在电子束参数一定的情况下, 转换靶越厚, 韧致辐射光子在靶材料中的衰减越大, 则 1 m 处的照射量越低; 另一方面, 转换靶很薄, 虽然韧致辐射光子在靶材料中的衰减较小, 但束电

子穿过靶的几率却增大, 因而使得 1 m 处的照射量较低. 这意味着存在靶的一个厚度, 使得 1 m 处的照射量最大. 我们将采用蒙特卡罗模拟来验证这一点.

## 1 发射度

电子束发射度是描述电子束内电子横向运动情况的物理量. 粒子输运理论已表明, 轴对称连续电子束的二维相空间的形状为椭圆. 若用  $A_n$  表示该椭圆的面积, 那么轴对称电子束的归一发射度  $\epsilon_n$  就定义为电子束在相空间的面积  $A_n$  除以  $\pi$ , 即

$$\epsilon_n = \frac{A_n}{\pi} = \gamma\beta\epsilon \quad (1)$$

式中,  $\gamma$  为相对论质量,  $\beta$  为相对论速度,  $\epsilon$  为边发射度. 电子束的常用分布主要有 KV 分布、WB 分布、GS 分布以及 BNT 分布, 施将君对这些分布进行了详细的研究<sup>[6]</sup>, 结果表明: KV 分布趋于保守, 其它三种分布更接近于实验测量结果. 因此, 为简单起见, 下面我们假定电子束的分布为 WB 分布.

假定  $z$  轴为束轴, 并令  $x' = dx/dz$ ,  $y' = dy/dz$ , 则电子束的分布函数  $f(x, y, x', y')$  为

$$f(x, y, x', y') = \frac{2}{\pi^2 abuv} \quad (2)$$

$$\epsilon = \epsilon_x = \epsilon_y, \epsilon_x = au, \epsilon_y = bv \quad (3)$$

考虑简单的情形:  $a = b = R$ ,  $u = v = \sigma$ . 这里,  $R$  为电子束半径,  $\sigma$  为束电子的最大横向偏角.

图 1 是关于电子的抽样结果, 图 1(a) 为  $x-x'$  平面上电子的分布(20000 个电子), 图 1(b) 为电子的  $x$  坐标分布.

\* 国防科技基础研究基金资助课题

Tel: 0816-2485148 Email: liujun\_ifp@etang.com

收稿日期: 2003-12-08

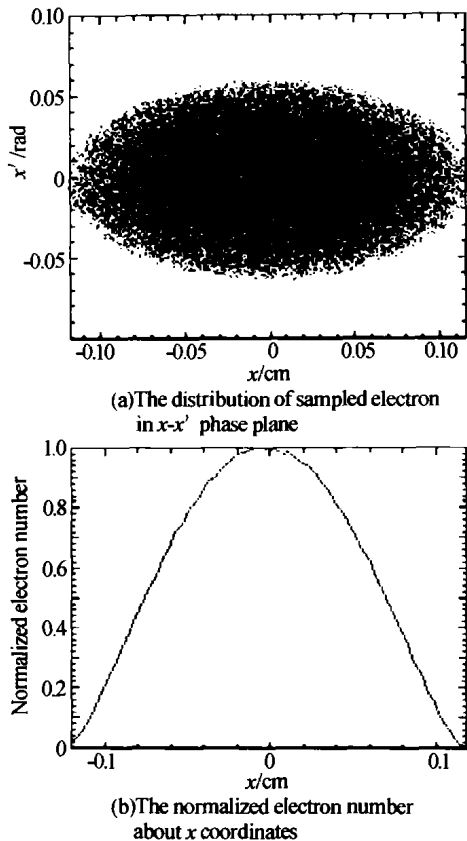


图1  $x-x'$ 相平面中的电子抽样结果  
Fig. 1 The sampled results of electrons in  $x-x'$  phase plane

### 2 发射度对 X 光源能谱的影响

为考察韧致辐射光子能量的分布,我们对归一发射度为零和 300 cm. mrad 的二种情况分别计算了靶前 1 m 处的光子通量谱,如图 2.

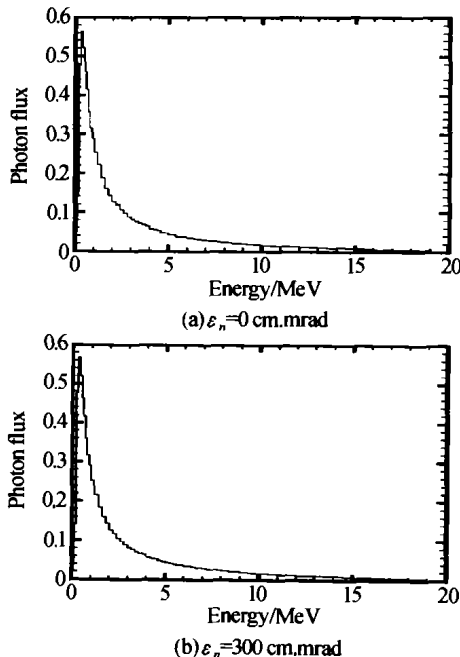


图2 靶正前方 1 m 处的光子通量谱  
Fig. 2 The photon flux at 1 m from the converting target

由图 2 可以看出,有无发射度对光子通量谱的谱形影响不大.但在发射度  $\epsilon_n=0$  cm. mrad 的情况下,靶正前方 1 m 处的光子平均能量为 3.29 MeV;

在发射度  $\epsilon_n=300$  cm. mrad 的情况下,靶正前方 1 m 处的光子平均能量为 3.24 MeV,这说明发射度的存在会产生更多的低能光子.

### 3 束参量对光源照射量的影响

电子束转换靶正前方 1 m 处的照射量  $X_1$  是 X 光闪光机设计的一个主要指标,为了弄清发射度和束半径对  $X_1$  的影响,在电子束能量为 20 MeV、靶厚度 0.15 cm 的情况下,针对不同的归一发射度和电子束半径,利用蒙特卡罗方法计算了韧致辐射转换靶正前方 1 m 处的照射量  $X_1$ ,计算结果如图 3 和图 4 所示. 图 3 中的归一  $X_1$  是在给定的电子束半径下用最大的  $X_1$  来归一的,从下而上的 15 条对应的电子束半径分别为 0.05、0.075、0.10、0.12、0.15、0.20、0.25、0.30、0.35、0.40、0.45、0.50、0.60、0.70 和 0.80 cm. 图 4 中的归一  $X_1$  是除以一个很大的值得到的,从上到下的 9 条曲线对应的归一发射度分别为 0、100、200、300、400、500、600、700 和 800 cm. mrad.

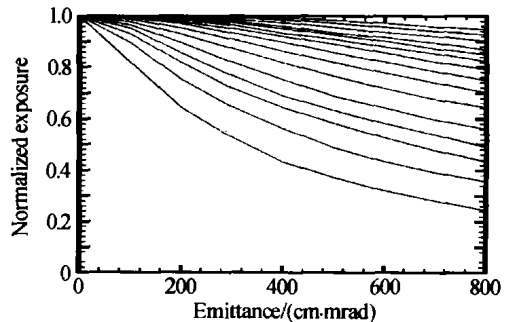


图3 归一  $X_1$  随归一发射度的变化  
Fig. 3 The relation between normalized  $X_1$  and normalized emittance

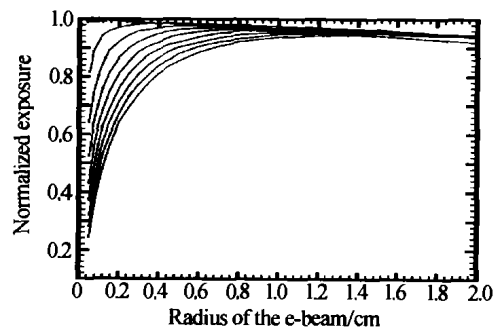


图4 归一  $X_1$  随束半径的变化  
Fig. 4 The relation between normalized  $X_1$  and the radius of e-beam

由图 3,在给定电子束半径  $R_b$  的条件下, $X_1$  随归一发射度  $\epsilon_n$  的增加而减小. 在电子束半径较小的情况下, $X_1$  随归一发射度  $\epsilon_n$  的增大而减小的速率较快;在电子束半径较大的情况下, $X_1$  随归一发射度  $\epsilon_n$  的增大而减小的速率较慢. 也就是说,电子束半径越小,归一发射度对转换靶正前方 1 m 处的照射量的影响越大;电子束半径越大,归一发射度对转换靶正前方 1 m 处的照射量的影响越小,在电子束半

径大于 1 cm 时,最大的归一发射度(800 cm. mrad)对转换靶正前方 1 m 处的照射量的影响不会超过 10%。这是因为在给定束半径下,归一发射度越大,击靶电子的横向偏角越大,则韧致辐射光子向转换靶正前方 1 m 处出射的几率减小,从而转换靶正前方 1 m 处的照射量随归一发射度的增加越来越低。另外,在束半径较小的时候,击靶电子的横向偏角随归一发射度增大的幅度较大,导致韧致辐射光子向转换靶正前方 1 m 处出射几率降低的幅度也较大,进而转换靶正前方 1 m 处的照射量随归一发射度的增大而快速降低;反之,在束半径较大的时候,击靶电子的横向偏角随归一发射度增大的幅度较小,导致韧致辐射光子向转换靶正前方 1 m 处光子的出射几率降低的幅度也较小,则转换靶正前方 1 m 处的照射量随归一发射度的增大而缓慢降低。

图 4 表明,在固定归一发射度时, $X_1$  随电子束半径的增大而迅速增大;当束半径为某一值以后, $X_1$  随电子束半径的增大而缓慢降低。这说明,对于给定的归一发射度,存在一个束半径,使得  $X_1$  的值最大。在束半径较小的时候,束电子的横向偏角偏大,击靶束电子的发散就更严重,则韧致辐射光子向转换靶正前方 1 m 处出射的几率就很低,相应的  $X_1$  值也就低;随着束半径的增大,束电子的横向偏角减

小,击靶电子的发散就越来越不严重,从而使得韧致辐射光子向转换靶正前方 1 m 处出射的几率越来越大,相应的  $X_1$  值也就越来越高;但是,当束半径大到一定程度以后,束电子的横向偏角非常小,可以近似将击靶束看成是垂直入射的,由于束半径很大,而高能电子韧致辐射的前冲性又很强,韧致辐射光子向转换靶正前方 1 m 处出射的几率就很低了,相应的  $X_1$  值也很低,因而存在一个最大的  $X_1$  值。该最大值所对应的束半径与归一发射度有关,发射度越大,最大  $X_1$  所对应的束半径也越大,这是由束电子的横向偏角所决定的。

由以上的分析不难发现:1) 电子束击靶半径越小、发射度越小时, $X_1$  值越高,电子束击靶半径越小而发射度越大时, $X_1$  值越低;2) 当电子束击靶半径大到一定程度时,归一发射度对  $X_1$  值的影响很小,可以忽略发射度的作用。

#### 4 束参量对照射量分布的影响

图 5 给出了束半径分别为 0.075、0.15 和 1.0 cm 时,在 20 度范围内靶前 1 m 处的照射量角分布随发射度的变化情况。每个图从下到上的 9 条曲线对应的归一发射度分别为 0、100、200、300、400、500、600、700 和 800 cm. mrad。

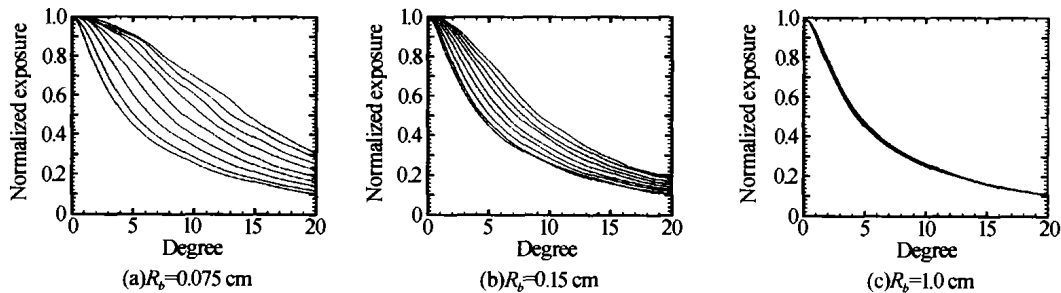


图 5 电子束发射度对照射量角分布的影响

Fig. 5 The effect of the e-beam emittance on the angular distribution of exposure

从图 5 中不难看出,在电子束半径一定的情况下,归一发射度越大,照射量角分布曲线越趋于平缓。因为归一发射度越大,束电子的横向偏角越大,对应的照射量空间分布越趋于均匀,因而照射量角分布曲线越趋于平缓。但是,当电子束半径大到一定程度时(图 5(c)),归一发射度对照射量角分布的影响很小,这是因为在电子束半径很大的时候,即使归一发射度相当高(如 800 cm. mrad),对应的束电子的横向偏角也是比较小的,此时电子束近似垂直击靶,所以其照射量角分布近似与发射度无关。

图 6 给出了归一发射度分别为 0、200 和 500 cm. mrad 时,在 20 度范围内靶前 1 m 处的照射量角分布随电子束半径的变化情况。除图 6(a)外,每个图从上到下的 8 条曲线对应的电子束半径分别

为 0.075、0.10、0.12、0.15、0.20、0.30、0.50 和 1.0 cm。图 6 表明,当归一发射度一定时(如图 6(b) 和图 6(c)),随着束半径的增加,照射量空间分布的均匀性减弱。这是因为在规定的发射度下,束半径越大,束电子的横向偏角越小,因而照射量的空间分布越不均匀。然而,在 0 发射度的情况下(图 6(a)),照射量空间分布的均匀性随束半径的增加而略有改善。发射度为 0,表示电子束中的所有电子都是垂直入射的,照射量的空间分布主要由束半径决定,那么,增大束半径有利于提高照射量的空间分布;又由于再大的束半径相对于光场而言总是小量,则对照射量空间分布均匀性的改善是很差的。

为了说明发射度对 X 射线成像的影响,我们针对 Mueller 提供的实验结果<sup>[7]</sup>进行对比结算,图 7 采

用的电子束半径均为 0.15 cm,靶厚度 0.0762 cm,电子束能量为 17 MeV,其中图 7(a)是不考虑发射度的

MC 模拟结果,图 7(b)是假定发射度为 300 cm.mrad 的 MC 模拟结果,图 7(c)是文献[7]提供的实验结果.

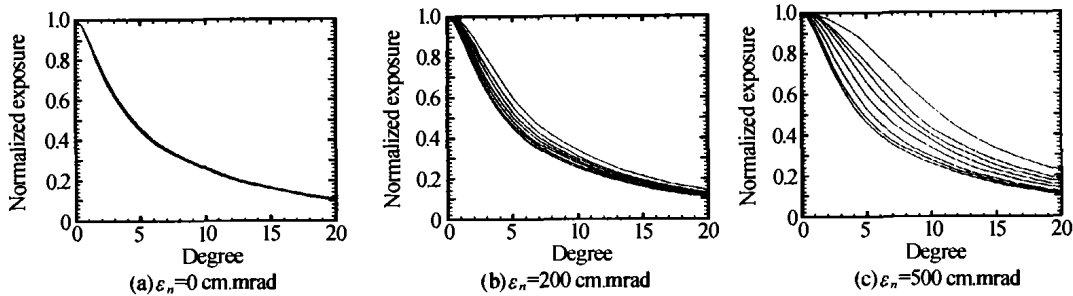


图 6 电子束半径对照射量角分布的影响

Fig. 6 The effect of the e-beam radius on the angular distribution of exposure

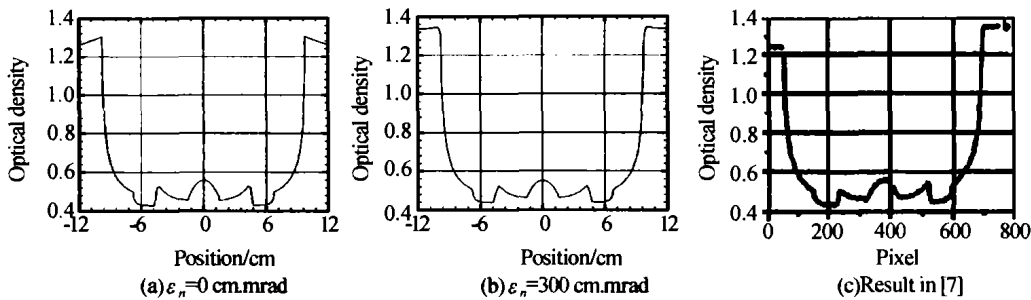


图 7 有无发射度的模拟结果与文献[4]中的实验结果

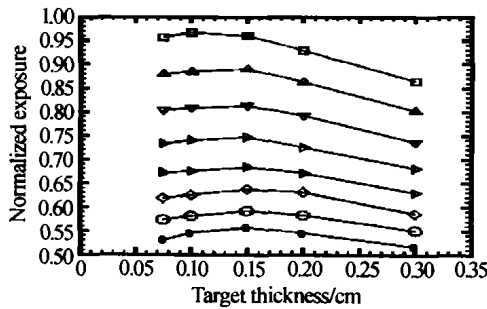
Fig. 7 Simulation results with/without emittance and experimental result in literature [4]

显然,在考虑发射度的情况下,MC 模拟结果更接近于实验结果,特别是在角度较大的客体边缘处,考虑发射度与不考虑发射度的效果十分明显.

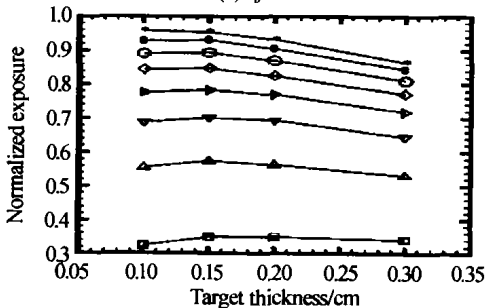
### 5 靶厚度对光源强度的影响

图 8 给出了靶前 1 m 处的照射量随靶厚度的变化曲线,图 8(a)是在电子束半径为 0.15 cm 时,针对不同发射度的变化,从上到下的 8 条曲线分别对

应的发射度为 100、200、300、400、500、600、700、800 cm.mrad;图 8(b)是在发射度为 600 cm.mrad 时,针对不同电子束半径的变化曲线,从下到上的 8 条曲线分别对应的半径为 0.05、0.10、0.15、0.20、0.25、0.35 和 0.40 cm.



(a)  $R_e=0.15$  cm



(b)  $\epsilon_n=600$  cm.mrad

图 8 靶前 1 m 处照射量随靶厚度的变化曲线

Fig. 8 The exposure curve with target thickness at 1 m from the converting target

图 8 表明,在给定的电子束半径和发射度下,都存在一个靶厚度使得 1 m 处的照射量最大. 图 8(a)说明在电子束半径一定的情况下,归一发射度越小,使 1 m 处的照射量最大的靶厚度越小. 图 8(b)说明在归一发射度一定的情况下,电子束半径越大,使 1 m 处的照射量最大的靶厚度越小,其中电子束半径为 0.40 cm 的变化曲线没有出现最大值,说明使一米处的照射量最大的靶厚度小于 0.10 cm.

通过大量不同电子束半径和发射度的蒙特卡罗模拟,以上结论仍成立.

### 6 结论

影响 X 光源特性的参数研究表明:

- 1) 给定束半径,归一发射度越小,靶正前方 1 m 处的照射量越大,但照射量的空间分布越不均匀;
- 2) 给定归一发射度,照射量空间分布的不均匀性随束半径的增加而严重,但存在一个束半径,使得靶正前方 1 m 处的照射量最大;
- 3) 在发射度为 0 的理想情况下,增大电子束半径对照射量空间分布的均匀性略有改善;
- 4) 对于任意电子束,都存在一个靶厚值,使得靶正前方 1 m 处的照射量最大.

以上说明,束半径和归一发射度对 X 光源的影响是相互制约的,不能为了得到较小的光斑尺寸而忽视发射度的作用,也不能为了光场的均匀性而无限制地增大发射度. 对于图像接收系统,除了选择合适的靶厚度外,还要考虑束半径和发射度对照射量及其空间均匀性的影响. 因此,在闪光机设计和 X 射线成像系统的蒙特卡罗模拟中,必须综合考虑电子束的发射度和击靶半径.

### 参考文献

- 1 赵宝升,王俊锋,桂建保. 脉冲 X 射线源的获取及门控成像. 光子学报,2003,32(12):1450~1452  
Zhao B S, Wang J F, Gui J B. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(12):1450~1452
- 2 陶纯堪,陶纯匡. 光学信息论. 北京:科学出版社,1999. 214~216  
Tao C K, Tao C K. Discussion on Optical Information. Beijing: Science Press, 1993. 214~216
- 3 Martin T H. A Computerized Method of Predicting Electron Beam Bremsstrahlung Radiation with Specific Application to High-Voltage Flash X-ray Machines, SC-RR-69-241, 1969
- 4 施将君. 束参量对 X 射线照射量的影响. 强激光与粒子束,1995,7(4):613~617  
Shi J J. *High Power Laser and Particle Beams*, 1995, 7(4): 613~617
- 5 程树英,沈鸿元,陈美锋. 面光源对人肺组织中光能分布的影响. 光子学报,2003,32(10):1250~1253  
Cheng S Y, Shen H Y, Chen M F. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(10):1250~1253
- 6 施将君,李献文,刘军. 闪光机照相量及其分布的参量依赖关系. 强激光与粒子束,1998,10(1):108~112  
Shi J J, Li X W, Liu J. *High Power Laser and Particle Beams*, 1998, 10(1):108~112
- 7 Mueller K H. Collimation Techniques for Dense Object Flash Radiography. In: Andre M, Hugenschmidt M. Proceedings of the 16th International Congress on High Speed Photography and Photonics, Strasbourg, France, 1984 (Spie, Vol 491). Washington: SPIE, 1984. 130~136

## Parameters Affecting the Characteristic of X-ray Source

Liu Jun<sup>1</sup>, Cui Wei<sup>2</sup>, Shi Jiangjun<sup>1</sup>, Liu Jin<sup>1</sup>, Li Biyong<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900

<sup>2</sup> Computer department, College of Engineering, CAEP, Mianyang 621900

Received date:2003-12-08

**Abstract** The characteristic of X-ray source is one of the most important parameters on the image quality of radiography. The X-ray source is composed of bremsstrahlung photons produced by the high-energy electron beam impinging on the heavy metal target. The effects of parameters (include radius and emittance of the e-beam and the target thickness) on the characteristic of X-ray source are detailed by means of Monte Carlo method. It is shown that (1) giving a e-beam radius, the exposure at 1m from the converting target increases and the uniformity of exposure distribution becomes bad, when the normalized emittance of e-beam decreases; (2) for a given normalized emittance, the exposure uniformity becomes bad, when the e-beam radius increases, but there exists an e-beam radius under which the exposure at 1m is the largest; (3) in the case of zero emittance, enlarging the e-beam radius can slightly improve the uniformity; and (4) given an e-beam, there exists a target thickness which causes the exposure at 1m to be the largest. Therefore, the radius and emittance of e-beam and the target thickness should be integrated with the design and Monte Carlo simulation for radiography.

**Keywords** Monte carlo simulation; Parameters of the electron beam; Converting target; Exposure

**Liu Jun** was born in 1965, in Chongqing, P. R. China. Now he is a candidate for Ph. D. in Institute of Fluid Physics, CAEP. His research fields include the flash X-ray radiography and reliability assessment.

