

聚焦电子束对透射式微焦点 X 射线源的影响

牛耕^{1,2}, 刘俊标^{1,2*}, 赵伟霞¹, 韩立^{1,2}, 马玉田^{1,2}

¹中国科学院电工研究所超导与新材料应用研究实验室, 北京 100190;

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 微焦点 X 射线源是微计算机断层扫描技术设备的核心部件。研究了电子束在靶材中的横向扩散引起的透射式微焦点射线源的焦点尺寸和强度的变化规律。结果表明:当打靶电子束的束流密度遵循高斯分布时,其产生的 X 射线强度也遵循高斯分布,该分布的标准差可以用来精确表示 X 射线的焦点尺寸;当靶材厚度可以使沉积电子束的能量达到 60% 时,对应的靶材产生的 X 射线强度最高;随着靶材厚度增加,X 射线的焦点尺寸逐渐变大;增大电子束的加速电压可以适当减小 X 射线的焦点。本研究为透射式微焦点 X 射线源的靶材选择和设计提供了理论依据。

关键词 X 射线光学; 微计算机断层扫描技术; X 射线焦点; 电子束; 扩散

中图分类号 TN16

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.0634001

Effect of Focused Bombarding Electron Beam on Transmission Microfocus X-Ray Source

Niu Geng^{1,2}, Liu Junbiao^{1,2*}, Zhao Weixia¹, Han Li^{1,2}, Ma Yutian^{1,2}

¹Laboratory of Superconductors and New Materials, Institute of Electrical Engineering,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract Microfocus X-ray source is the core component of micro-computed tomography (micro-CT). This study investigates the relationship between the changes in the focal spot size and intensity of the transmission microfocus X-ray source caused by the lateral diffusion of the electron beam in the target. Results show that, if the density distribution of the electron beam follows a Gaussian distribution, the distribution of the X-ray intensity should also be Gaussian. The standard deviation of the X-ray intensity distribution exactly represents the size of the X-ray focal spot. Furthermore, results show that when the energy deposition of the electron beam in the target reaches 60%, the intensity of the X-ray produced by the target reaches the maximum value, correspondingly. With an increase in the target thickness, the focal spot size of the X-ray source gradually increases; conversely, an increase in the acceleration voltage of the electron beam can appropriately reduce the focal spot size of the X-ray source. This study provides theoretical guidance for target material selection and design of transmission microfocus X-ray source.

Key words X-ray optics; micro-computed tomography; X-ray focal spot; electron beam; diffusion

OCIS codes 340.7460; 110.7440; 180.7460

1 引 言

微计算机断层扫描技术(Micro-CT)是一种利用微焦点 X 射线对样品进行扫描,然后将扫描数据转换成三维图像的无损成像技术,可以检测样品从微米到亚微米尺度的内部结构。通过 Micro-CT 可

以发现样品内部的细微缺陷,因此,Micro-CT 在微电子、生命科学、微电子机械系统(MEMS)、核聚变靶球等领域得到了广泛应用^[1-4]。其中,X 射线源的焦点大小是影响 Micro-CT 分辨率的主要因素。常用的 X 射线源通常由阴极、栅极、阳极、电子聚焦透镜和靶材等组成,阴极在高压电源的加热下产生电

收稿日期: 2019-01-15; 修回日期: 2019-02-11; 录用日期: 2019-03-11

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发项目(2017YFF0107202)、中国科学院关键技术研发团队项目(GJJSTD20170005)、中国科学院关键技术研发团队项目(GJJSTD20170004)

* E-mail: liujb@mail.iee.ac.cn

子束并加速,经过电子聚焦透镜后形成的微焦点电子束轰击靶材,进而产生微焦点 X 射线。大量的实验表明:轰击靶材的电子束束斑与 X 射线焦点的大小密切相关^[5]。实际上,电子和靶材原子的散射作用会使电子束在靶材中产生横向扩散,其扩散范围约为几微米,而分辨率较低的计算机断层扫描(CT)的焦点尺寸通常为数十微米,此时电子束的横向扩散对 X 射线焦点尺寸的影响不大;然而,当 X 射线源的焦点尺寸为微米量级时,电子束的横向扩散范围与焦点尺寸相当,就会对 X 射线的焦点尺寸造成较大影响。电子束的横向扩散现象越严重,产生的 X 射线源的尺寸也就越大。

目前,微焦点 X 射线源靶材有透射靶和反射靶两种。与反射靶相比,透射靶材的靶面材料大都只有几微米厚,X 射线经过靶材透射而出,显著减弱了因电子束的横向扩散而导致的 X 射线源焦点变大的现象,因此在 Micro-CT 系统中得到了广泛应用^[6-7]。Li 等^[8-11]基于电子束与物质的相互作用机理,研究了靶材参数和 X 射线强度的关系。Ihsan 等^[12-14]虽然研究了电子束在靶材内的横向扩散,但没有深入研究其对射线源焦点尺寸的影响。事实上,电子束打靶时存在横向扩散现象,使得电子束与靶材的相互作用区域大于电子束的焦点尺寸,从而造成 X 射线焦斑的扩大。尤其是对微米及亚微米级的 X 射线源而言,电子束作用范围的横向扩展对 X 射线实际焦斑的影响不可忽视,因此需要进行详细研究。

本课题组利用蒙特卡罗方法计算了不同能量的微聚焦电子束与不同靶材的相互作用,模拟了电子束在靶材中的运动和能量沉积情况,得到了不同情况下 X 射线焦点的变化规律,为 Micro-CT 中靶材的选择提供了参考。

2 电子束与靶材的相互作用

常见的 Micro-CT 用 X 射线源主要利用聚焦电子束轰击金属靶材获得。进入靶材内部的电子通过非弹性散射损耗能量,主要方式有两种,即与原子壳层的电子作用或与原子核发生作用。其中,电子束与原子核发生非弹性散射损失的能量是 X 射线的主要能量来源,X 射线的产量与靶材的原子序数、打靶的电子数量、电子加速电压的平方成正比。

电子和原子核发生散射后偏离原来运动方向的角度 θ 与原子序数、电子的运动速度等有关,可以表示为

$$\cot \theta = \frac{4b \cdot \pi \epsilon_0 \cdot E}{Ze^2}, \quad (1)$$

式中: b 为电子的瞄准距离,即原子核与电子运动方向的垂直距离; ϵ_0 为介电常数; E 为电子的能量; Z 为原子序数; e 为电子所带电荷量。由(1)式可知,当靶材为同一种物质时,从同一位置出射的电子能量越高,散射角 θ 越小,也就意味着电子的穿透能力越强。该穿透能力与电子束的加速电压有关,其最大穿透深度 H 可以表示为^[15-16]

$$H = 66.7 \times \frac{U^{5/3}}{\rho}, 10 \text{ kV} \leq U \leq 1 \text{ MV}, \quad (2)$$

式中: U 为电子束的加速电压; ρ 为金属靶材的密度。电子束的能量并非均匀地沉积在靶材中,而是随着深度的变化而变化,能量沉积值 P 可以表示为穿透深度 h 的函数^[13-14],即:

$$P(h) = \frac{4}{3}\bar{P} - 3\bar{P}\left(\frac{h}{H} - \frac{1}{3}\right)^2, 0 \leq h \leq H, \quad (3)$$

式中: $P(h)$ 为电子束在与靶材表面距离为 h 的深度时的能量沉积值; \bar{P} 为电子束在靶材内的平均能量沉积值。

X 射线靶材通常选用原子序数比较高的金属,以提高 X 射线的产率。根据(2)~(3)式可以计算出不同能量的电子束在靶材中的最大穿透深度,以及不同深度处电子束的能量沉积值。以钨为例,能量为 30,90,150 keV 的电子束在钨靶材中的最大穿透深度分别为 1.00,6.23,14.6 μm 。不同能量的电子束在钨靶材中的能量沉积相对值随深度的变化如图 1 所示。

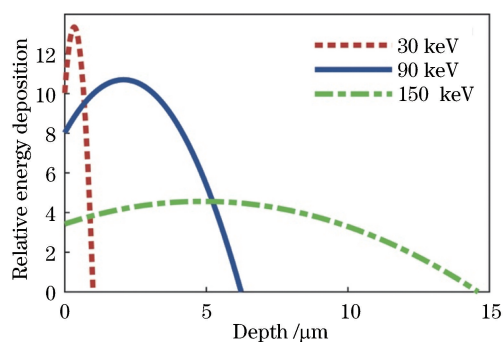


图 1 电子束能量沉积相对值与穿透深度的关系
Fig. 1 Relative energy deposition as function of penetration depth of electron beam

由于电子束与靶材相互作用的过程是随机的,考虑到电子的数量以及靶材中粒子的数量极为庞大,使用蒙特卡罗方法模拟电子束和物质的相互作用比较合适。作为对比,使用蒙特卡罗仿真软件 Geant4 计算了当电子束加速电压为 90 kV、束斑半

径为 $2.5 \mu\text{m}$ 、靶材材料为钨时,电子束与靶材的相互作用,以及在作用范围内电子束在靶材内的能量沉积情况,结果如图 2 所示。从图 2 可以看出:电子束在金属中的最大穿透深度与能量沉积的关系与(2)~(3)式的结果较为吻合,因此,使用(2)~(3)式

来计算电子束在金属靶材中的最大穿透深度是合理的。此外,从图 2 中还可以看出:电子束在金属中不仅有纵向的穿透,还有较为明显的横向扩散,其作用范围的横向尺寸明显大于电子束的直径,这是 X 射线焦点尺寸大于电子束焦点的主要原因。

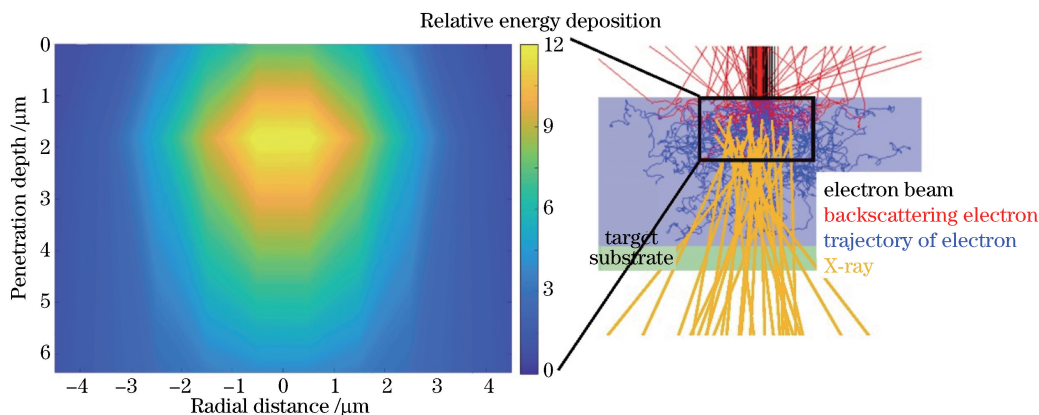


图 2 90 keV 电子束与钨靶材相互作用(右)以及能量沉积(左),左图为右侧图黑色框内能量沉积情况
Fig. 2 Energy deposition (left) and interaction (right) between electron beam with energy of 90 keV and tungsten target.
Plot in left panel is energy deposition of black box in right panel

电子束与靶材原子核产生非弹性散射造成的能量损失是 X 射线的主要来源,因此,电子束在金属中能量沉积最大时的深度(发生散射最多的深度)即为 X 射线产生量最大的深度。结合图 1 和图 2 可以看出:电子束在金属靶材中的能量沉积值随着深度的增加而先增加后减小,能量沉积最大的地方并非靶材的表面,而是距其表面约 $H/3$ 的深度。为了提高 X 射线的强度,金属靶材需要有一定的厚度。此外,随着靶材厚度增加,靶材不仅会吸收大量的 X 射线,导致 X 射线强度降低,还会造成 X 射线的焦点变大,影响最终 X 射线图像的质量。因此,根据电子束的能量和束斑大小选择合适厚度的靶材,不仅可以适当提高 X 射线的强度,还可以限制 X 射线的焦点尺寸,进而提高系统的成像速度和 X 射线图像的空间分辨率。

知:样品边界处的灰度值变化(即半影模糊)也符合高斯分布, δ 越小,高斯分布的离散程度越小,则样品边界处的变化越明显,越容易区分,X 射线成像的图像质量就越高;相反,当 δ 值较大时,样品的边界越容易出现伪影,影响了 X 射线图像的分辨率。根据 Salamon 等^[18]的计算结果,可以定义当 X 射线强度降至高斯分布最高值的 10% 处时为 X 射线焦点的边界,可以得出此时 X 射线的焦点半径 $R = 2.14\delta$ 。

3 仿真结果与讨论

3.1 电子束束流密度分布对 X 射线焦点大小的影响

电子枪发射的电子束束流密度在截面上通常符合高斯分布^[17],因此由靶材产生的 X 射线强度截面也符合高斯分布,即

$$I(r) \sim N(0, \delta^2), \quad (4)$$

式中: $I(r)$ 为 X 射线在到高斯分布对称轴距离为 r 处的强度,对称轴与电子束的中心轴重合,当 $r=0$ 时, $I(r)$ 达到最大值; δ 为标准差,表示高斯分布的离散程度。图 3 为 X 射线成像原理图。由图 3 可

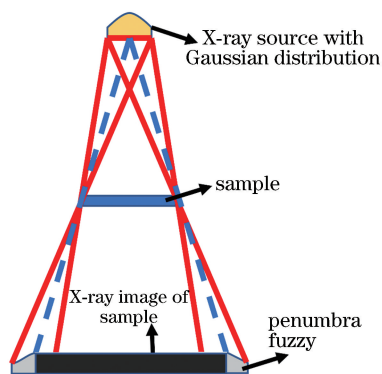


图 3 X 射线成像原理图

Fig. 3 Principle of X-ray imaging

3.2 电子束能量沉积与微焦点 X 射线强度的关系

X 射线主要是由电子束与靶材原子核发生非弹性散射碰撞时释放的能量转化而成的,在靶材内既有 X 射线产生,也有 X 射线被靶材吸收。因此,需要研究电子束与靶材作用时,穿过靶材透射而出的

X射线的强度。

为了研究不同能量电子束、不同厚度靶材产生的 X 射线焦点的大小和强度,使用仿真软件分别计算了电子束能量沉积总量为 20%~100%时,靶材产生的 X 射线的强度分布,仿真条件如表 1 所示。

表 1 电子束与靶材相互作用的仿真条件

Table 1 Simulation conditions of interaction between electron beam and target

Parameter	Condition
Acceleration voltage of electron beam /kV	30, 60, 90, 120, 150
Spot diameter of electron beam / μm	5
Incident direction of electron beam	Perpendicular to target
Material of target	Tungsten, molybdenum, chromium
Thickness of target	Corresponding thickness which can deposit different energy percentages of electron beam (20%, 40%, 60%, 80% and 100%)

图 4 给出了不同加速电压的电子束在不同厚度靶材下所产生的 X 射线的相对强度的对比,其中,靶材的厚度以电子束损失的能量来表示,分别计算了电子束损失 20%、40%、60%、80%、100% 能量时对应厚度的靶材产生的 X 射线的强度。从图 4 可以看出:随着靶材厚度增加,与靶材相互作用的电子数量逐渐增加,产生的 X 射线数量大于靶材吸收的 X 射线数量,因此, X 射线的出射强度增加;当靶材的厚度可以沉积超过 60% 的电子束能量时,由于产生的 X 射线数量小于吸收的 X 射线数量, X 射线的出射强度开始下降。可以认为:当靶材的厚度可沉积电子束能量的 60% 左右时,对应厚度的靶材的 X 射线产率达到最高。这一厚度与 Korenev^[19] 的计算结果相符。该厚度与电子束能量沉积最多的厚度 $H/3$ 不符,这是因为 X 射线的出射量还需要考虑 X 射线在靶材内的吸收情况,出射量为产生量和吸收量之差。

随着靶材厚度变化,出射的 X 射线不仅在强度上会发生变化,焦点也会发生变化。当电子束的加速电压为 90 kV 时、电子束在损失能量为 20%~100% 时,产生的 X 射线的高斯分布如图 5 所示。此时, X 射线高斯分布的 δ 值分别为 1.98, 2.57, 3.19, 3.68, 4.18 μm 。 X 射线的离散越严重, δ 值越大, X 射线源的焦点就越大, X 射线成像系统的分辨率就越低。由此可知:当电子束能量相同时,靶材厚度的增加除了会影响 X 射线的强度,也会影响 X 射线高斯分布的 δ 值,靶材的厚度越小, X 射线的焦点就越小;反之,靶材的厚度越大, X 射线的焦点就越大。

需要说明的是,当靶材的厚度不足以吸收全部的电子束能量时,剩余的电子束进入金刚石基底,当电子束进入金刚石后,能量大大减小,且由于金刚石的原子序数较低, X 射线的产量极低,因此基底产生的 X 射线可以忽略不计。

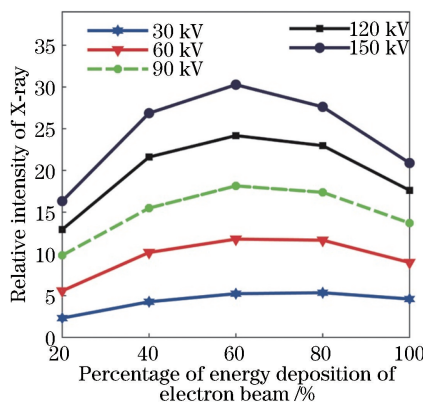


图 4 不同能量的电子束产生的 X 射线强度

Fig. 4 Intensity of X-ray produced by electron beam with different energies

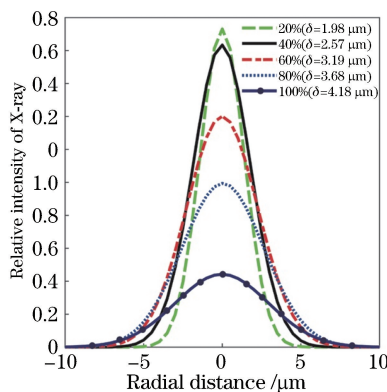


图 5 90 keV 电子束在 20%~100% 损失能量下产生的 X 射线的高斯分布

Fig. 5 Gaussian distribution of X-ray produced by 90 keV electron beam with energy loss of 20%-100%

3.3 电子束能量对 X 射线焦点大小的影响

通常情况下,在使用 X 射线成像设备时,不会根据电子束的能量来选择合适的靶材,因此本课题

组也探究了在相同的靶材厚度下,不同能量的电子束产生的 X 射线焦点的变化,结果如图 6 所示。由图 6 可知:随着电子束能量增加,靶材所产生的 X 射线焦点反而有所缩小,这是因为在同样的靶材中,能量低的电子束的穿透能力较弱,因此主要体现为横向扩散,产生的 X 射线源的束斑较大;而能量较高的电子束由于穿透能力较强,刚进入靶材时主要体现为纵向穿透,横向的扩散现象反而较弱,因此产生的 X 射线的束斑反而较小。

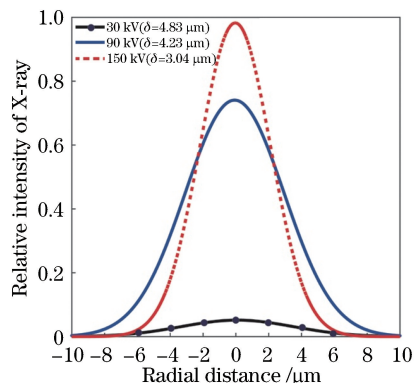


图 6 不同能量的电子束产生的 X 射线分布

Fig. 6 Distribution of X-ray produced by electron beam with different energies

实际上,随着加速电压增加,电子束在靶材内能穿透的最大深度也会不断加深,当加速电压分别为 30,60,90,120,150 kV 时,靶材的最佳 X 射线产率对应的靶材厚度分别为 0.5,1.5,3.0,4.8,7.0 μm 。由此可知:不同加速电压的电子束对应的靶材的最佳厚度有较大差别,若对所有加速电压的电子束均使用同一种靶材,则当电子束能量较低时,较厚的靶材不仅会大大削弱 X 射线的产率,还会加重电子束在靶材中的横向扩散,使 X 射线的焦点变大。此外,电子束能量较低时,虽然较薄的靶材有利于缩小 X 射线的焦点尺寸,但也会因为电子束无法与靶材充分发生作用而降低 X 射线的产率。因此,应根据实际需求来调整使用的靶材,以适当提高 X 射线的强度及缩小 X 射线的焦点。

3.4 靶材材料与 X 射线强度、焦点大小的关系

根据(1)式可知:电子束的穿透能力不仅与电子束的能量有关,还与靶材材料有关。在 X 射线成像设备中,铬、钼、钨均为常用的靶材,靶材的原子序数越小,产生的 X 射线强度越低,电子束在靶材中的穿透能力就越强,横向扩散现象也就越严重。图 7 为在相同加速电压下,3 种靶材在各自 X 射线出射率最佳时所产生的 X 射线的强度分布,可以看出:

随着原子序数减小,电子束在靶材中的穿透能力大大增加,使得产生的 X 射线焦点尺寸变大。此外,3 种靶材产生的最佳 X 射线强度也有较大区别,钨的原子序数最高,因此钨靶产生的 X 射线强度最高,钼靶产生的次之,铬靶产生的最小。

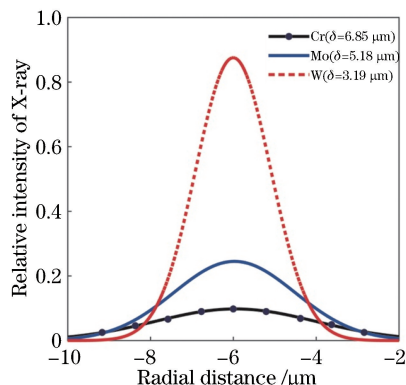


图 7 电子束能量为 90 keV 时不同靶材产生的 X 射线分布

Fig. 7 Distribution of X-ray produced from different targets by 90 keV electron beam

根据以上分析可知:在电子束与靶材相互作用过程中,电子与原子核的散射效应造成了电子在靶材内的横向扩散,使得 X 射线的焦点尺寸显著大于电子束的焦点尺寸。当电子束的束斑只有数微米时,这种横向扩散现象对 X 射线焦点尺寸的影响极大。电子束的能量越高,靶材的厚度越大,电子束在靶材内的散焦现象就越严重,产生的 X 射线焦点质量就越差。此外,材料不同的靶材所产生的 X 射线源也有区别,原子序数越低的靶材产生的 X 射线源的离散现象越严重,强度也越低。

4 结 论

高速聚焦电子束打靶时,电子束的作用区域不仅停留在靶材表面,还会深入到靶材内部。电子束除了在纵向有很强的穿透能力外,在横向也有一定的扩散能力,电子束与靶材的作用区域大于电子束的实际尺寸,导致靶材产生的 X 射线焦点尺寸变大。由于电子束的横向扩散范围约为数微米,因此当电子束的焦点尺寸为微米量级时,电子束的横向扩散引起的 X 射线焦点的变大就尤为明显。

针对电子束在靶材中的横向扩散引起的 X 射线焦点尺寸变大的现象,利用以蒙特卡罗为基础的仿真软件研究了电子束在靶材中的运动情况,以及产生 X 射线的强度分布情况。计算结果表明:对于同一靶材,电子束的穿透能力与电子束的加速电压正相关;横向扩散现象与电子束的加速电压负相关;

此外,靶材的厚度越大,电子束在靶材内的扩散现象就越严重。

靶材产生的 X 射线源的强度与靶材厚度有关,当电子束在靶材中的能量沉积值达到总能量的 60% 左右时,靶材有最高的 X 射线产率。X 射线源的焦点形状呈高斯分布,该分布的标准差 δ 与电子束的扩散现象紧密相关,电子束的扩散现象越严重, δ 就越大,产生的 X 射线焦点也就越大。

在 X 射线成像过程中,应根据电子束的能量和样品对 X 射线的衰减率选择合适的靶材,这样不仅可以提高 X 射线的强度,还可以减小 X 射线源的焦点尺寸,进而缩短系统的曝光时间,提高系统的空间分辨率。

本工作为 Micro-CT 设备中 X 射线靶材的选择提供了参考,在今后的工作中,本课题组将展开相关的实验研究。

参 考 文 献

- [1] Moreno-Atanasio R, Williams R A, Jia X D. Combining X-ray microtomography with computer simulation for analysis of granular and porous materials[J]. *Particuology*, 2010, 8(2): 81-99.
- [2] Gui J B, Hu Z L, Zhou Y, *et al.* Technology development of micro-CT with high spatial resolution [J]. *Computerized Tomography Theory and Applications*, 2009, 18(2): 106-116.
桂建保, 胡战利, 周颖, 等. 高分辨显微 CT 技术进展[J]. *CT 理论与应用研究*, 2009, 18(2): 106-116.
- [3] Yan J, Jiang S E, Su M, *et al.* The application of phase contrast imaging to ICF multi-shell capsule diagnosis[J]. *Acta Physica Sinica*, 2012, 61(6): 068703.
晏骥, 江少恩, 苏明, 等. X 射线相衬成像应用于惯性约束核聚变多层壳靶丸检测[J]. *物理学报*, 2012, 61(6): 068703.
- [4] Liu J B, Xi X Q, Han Y, *et al.* A new scattering artifact correction method based on K-N formula for cone-beam computed tomography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(11): 1134001.
刘建邦, 席晓琦, 韩玉, 等. 基于 K-N 模型的锥束 CT 散射伪影校正方法 [J]. *光学学报*, 2018, 38(11): 1134001.
- [5] Wang K G, Niu H B, Li J, *et al.* A new protable X-ray source with micro-beam [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, 33(6): 672-676.
王凯歌, 牛慈笨, 李冀, 等. 一种新型微束斑 X 射线源的研究[J]. *光子学报*, 2004, 33(6): 672-676.
- [6] Ihsan A, Heo S H, Cho S O. Optimization of X-ray target parameters for a high-brightness microfocus X-ray tube [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2007, 264(2): 371-377.
- [7] Li B L, Zhang P Y, Li B, *et al.* Optimized iterative method for projection decomposition of X-ray dual-energy computed tomography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(10): 1034001.
李保磊, 张萍宇, 李斌, 等. X 射线双能计算机层析成像投影分解的优化迭代方法[J]. *光学学报*, 2017, 37(10): 1034001.
- [8] Li Y G, Zhou W H, Huang L F, *et al.* Theoretical simulation of thermal behavior in transient heat loads testing of plasma-facing materials[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2011, 86(12): 2812-2820.
- [9] Trincavelli J, Castellano G. The prediction of thick target electron bremsstrahlung spectra in the 0.25-50 keV energy range [J]. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2008, 63(1): 1-8.
- [10] Zheng L, Liu H R, Sun B L, *et al.* Optimization of transmission-type anode target in microfocus X-ray tube [J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2015, 35(12): 1443-1448.
郑磊, 刘华荣, 孙步梁, 等. 微焦点 X 射线管透射式阳极靶的优化设计[J]. *真空科学与技术学报*, 2015, 35(12): 1443-1448.
- [11] Ma Y T, Liu J B, Huo R L, *et al.* Research on the preparation and performance of tungsten-aluminum transmission target for micro-computed tomography by magnetron sputtering[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2015, 51(11): 1416-1424.
马玉田, 刘俊标, 霍荣岭, 等. 基于磁控溅射法显微 CTW-Al 透射靶材的制备及其性能研究[J]. *金属学报*, 2015, 51(11): 1416-1424.
- [12] Ihsan A, Heo S H, Cho S O. A microfocus X-ray tube based on a microstructured X-ray target [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2009, 267(21/22): 3566-3573.
- [13] Hyun J K, Ercius P, Muller D A. Beam spreading and spatial resolution in thick organic specimens[J]. *Ultramicroscopy*, 2008, 109(1): 1-7.
- [14] Xu X D, Zhou B, Guo J C, *et al.* Monte Carlo simulation of interaction of electrons with anode in microstructure X-ray tubes [J]. *Chinese Journal of Computational Physics*, 2018, 35(1): 95-102.
徐小东, 周彬, 郭金川, 等. 微结构 X 射线源中电子与阳极作用的蒙特卡罗模拟[J]. *计算物理*, 2018, 35(1): 95-102.
- [15] Zhang X, Robinson V S, Raber T R, *et al.* THERMAL analysis of high-power X-ray target:

- scaling effects[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9590: 95900G.
- [16] Saeed Raza H, Jin Kim H, Nam Kim H, *et al.* Angle dependent focal spot size of a conical X-ray target[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2015, 96: 6-12.
- [17] Hu J W, Lü W, An B, *et al.* Review on simulation methods of micro focal spot X-ray tubes' electron emission system [C]//2014 15th International Conference on Electronic Packaging Technology, August 12-15, 2014, Chengdu, China. New York: IEEE, 2014: 1502-1506.
- [18] Salamon M, Hanke R, Krüger P, *et al.* Comparison of different methods for determining the size of a focal spot of microfocus X-ray tubes [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2008, 591(1): 54-58.
- [19] Korenev S. Target for production of X-rays [C]// Proceedings of the 2003 Particle Accelerator Conference, May 12-16, 2003, Portland, OR, USA. New York: IEEE, 2003: 1614-1615.