

# 基于锥形单玻璃管 X 射线聚焦镜表征 X 射线光源参数

王亚冰<sup>1,2</sup>, 邵尚坤<sup>1,2</sup>, 孙学鹏<sup>1,2</sup>, 张晓芸<sup>1,2</sup>, 李惠泉<sup>1,2</sup>, 孙天希<sup>1,2\*</sup>

1. 北京师范大学核科学与技术学院射线束技术教育部重点实验室, 北京 100875

2. 北京市辐射中心, 北京 100875

**摘要** X 射线光源的焦斑尺寸和焦深对 X 射线光谱学, 尤其是对于微区 X 射线衍射与荧光分析等领域十分重要的参数。如何高效而准确的表征这些参数对于 X 射线光源的应用和发展至关重要。现有的光源参数表征方法, 尤其在表征微焦斑光源的参数时, 都存在自身的局限性。锥形单玻璃管 X 射线聚焦镜是一种常用的 X 射线聚焦器件。根据锥形单玻璃管 X 射线聚焦镜滤波特性和几何特点, 分析得到聚焦镜的聚焦光能量上限的大小受到光源焦斑尺寸的影响, 提出这个能量上限与光源尺寸和光源到聚焦镜入口的距离之间的数学关系。设计了一种基于锥形单玻璃管 X 射线聚焦镜的表征 X 射线光源参数的方法。对锥形单玻璃管 X 射线聚焦镜的参数进行测量和确定后, 将聚焦镜放置要测量的光源前, 与光源形成聚焦光路。在光路准直并确保只有在聚焦镜内发生单次全反射的 X 射线射出聚焦镜的情况下, 通过改变聚焦镜与光源焦斑距离并利用能谱探测系统来探测聚焦光并得到多个对应的聚焦光能谱。对所得能谱进行计算与分析, 得到各能谱中的能量最大值, 即聚焦光的能量上限。利用聚焦光能量上限、光源焦斑尺寸和光源到聚焦镜的距离之间的关系并结合线性拟合法, 可同时得到光源焦斑尺寸和焦深。选用制造商给出焦斑尺寸约 60  $\mu\text{m}$ , 焦深为 20 mm 的微焦斑钨靶光源作为测量对象, 利用基于锥形单玻璃管 X 射线聚焦镜的表征方法测量的结果为焦斑尺寸为 60.1  $\mu\text{m}$ , 焦深为 19.7 mm。用小孔成像法表征该光源焦斑尺寸为 60.3  $\mu\text{m}$ , 焦深为 20.1 mm。相较于现有的方法, 基于锥形单玻璃管 X 射线聚焦镜的表征 X 射线光源参数方法对表征微焦斑光源有一定优势, 对表征高能 X 射线光源有潜在发展和利用价值。

**关键词** X 射线光源; 焦斑尺寸; 焦深; 全反射; 锥形单玻璃管 X 射线聚焦镜

**中图分类号:** O434.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2021)09-2812-05

## 引言

X 射线光源的应用和发展深刻影响着 X 射线光谱学的实践与进步, X 射线光源的焦斑尺寸(光源发光区域大小)和焦深(光源发光区域和铍窗距离)是对 X 射线光谱学, 尤其是微区 X 射线衍射与荧光分析等领域十分重要的参数<sup>[1-2]</sup>。如何高效而准确的表征这些参数对于 X 射线光源的应用和发展至关重要。测量光源焦斑尺寸的传统方法是小孔成像法<sup>[3]</sup>。该方法对于焦斑尺寸较大的光源是相对准确而高效的, 但由于小孔效应的影响, 测量时要保证小孔直径小于焦斑尺寸, 同时为了提高测量精度, 小孔的直径应该越小越好<sup>[4]</sup>。这对于焦斑尺寸在微米级或更小的微焦斑 X 射线光源而言, 小孔成像方法较难实现。因为要制造保证 X 射线只从

孔洞处通过, 且直径尺寸小于焦斑尺寸的小孔是十分困难的<sup>[5]</sup>。传统的测量焦深的方法是小孔扫描法<sup>[6]</sup>。由于该方法是从小孔成像测量焦斑尺寸的方法衍生而来, 其同样要求小孔直径应小于焦斑尺寸。为了适应微焦斑光源测量的需要, 有人提出利用多毛细管准直器测量光源焦斑尺寸的方法。该方法可以有效地对微焦斑光源焦斑尺寸进行测量, 但多毛细管准直器结构相对复杂, 制作误差小的器件难度较大, 且该方法测量焦深存在较大困难<sup>[5,7]</sup>。

本文提出一种基于锥形单玻璃管 X 射线聚焦镜(TG-MXC)同时测量 X 射线光源焦斑尺寸与焦深的方法。TG-MXC 是一种常用的 X 射线聚焦器件<sup>[8]</sup>, 其外形是圆台形, 相较于椭圆形单玻璃管 X 射线聚焦镜而言, TGMXC 结构相对简单, 制作上更容易实现。基于 X 射线在玻璃表面全反射的原理和 TGMXC 的几何特点, 提出 TGMXC 的聚焦射线能

收稿日期: 2020-08-16, 修订日期: 2020-12-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(11675019, 11875087)资助

作者简介: 王亚冰, 1992 年生, 北京师范大学核科学与技术学院博士研究生 e-mail: wyb007911@163.com

\* 通讯作者 e-mail: stxbeijing@163.com

量上限与聚焦镜和光源焦斑的距离,以及光源的焦斑尺寸的关系。通过测量与光源焦斑相距不同距离的 TGMXC 聚焦射线能量上限,利用上述关系和线性拟合可以同时得到光源焦斑尺寸和焦深。

### 1 原理

TGMXC 通常由高硼硅玻璃制作,对于有确定掠射角  $\theta$  的多色 X 射线而言,在光滑的高硼硅玻璃表面( $\rho=2.23 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )存在能发生全反射的最大入射能量  $E_m$  可表示为<sup>[9]</sup>

$$E_m = \frac{30}{\theta(\text{mrad})} (\text{keV}) \quad (1)$$

如果掠入射的 X 射线能量略大于  $E_m$  时,其反射率迅速降低至 20% 以下<sup>[10]</sup>,所以 TGMXC 有良好的滤波特性。

如图 1 所示,为了便于探测和调试,需确保光源发出的射线进入聚焦镜后只发生一次表面全反射。对于点光源而言,为实现在 TGMXC 内射线只进行一次全反射。光源与 TGMXC 入口的最小距离  $F_m$  可表示为

$$F_m = \frac{ID}{3OD - ID} L \quad (2)$$

式(2)中,  $ID$  是 TGMXC 入口直径,  $OD$  是 TGMXC 出口直径,  $L$  是 TGMXC 长度。对于有一定焦斑尺寸的光源,这个距离会更小。

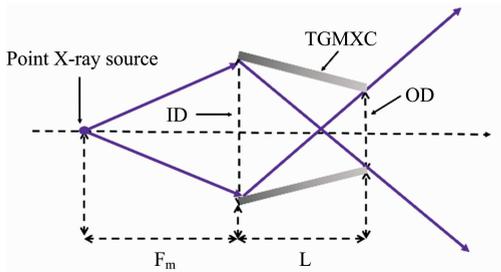


图 1 TGMXC 单次全反射极限情况示意图  
Fig. 1 Sketch of the limiting case of single total reflection of the TGMXC

在确保入射射线只发生一次全反射的情况下,如图 2 所示,可以由几何关系得到焦斑尺寸  $Z$  和最小的反射角  $\theta_{\min}$  的关系,该关系可表示为

$$\theta_{\min} = \frac{ID - OD}{2L} + \frac{OD - Z}{2(F + L)} \quad (3)$$

其中  $F$  为光源焦斑和 TGMXC 的距离。而最小的反射角  $\theta_{\min}$  对应能发生全反射的最大反射能量即聚焦光的能量上限可表示为

$$E_{\max} = C \frac{30}{\frac{ID - OD}{2L} + \frac{OD - Z}{2(F + L)}} \quad (4)$$

其中修正系数  $C$  是为了修正 TGMXC 的面型偏差导致的误差<sup>[11]</sup>。

如图 3 所示,在实际的测量过程中,能够直接被测量的只有光源铍窗到 TGMXC 入口的距离  $F_{b-e}$ ,所以我们还要考虑焦深  $D$ 。除了  $E_{\max}$  和  $F_{b-e}$  外,其他参数都可固定不变。

$E_{\max}$  随着  $F_{b-e}$  变化而变化。则光源焦斑尺寸  $Z$ , 焦深  $D$  和  $E_{\max}$  关系可表示为

$$\frac{1}{\left(\frac{60C}{E_{\max}} - \frac{ID - OD}{L}\right)} = \frac{1}{OD - Z} F_{b-e} + \frac{D + L}{OD - Z} \quad (5)$$

其中  $\frac{1}{\left(\frac{60C}{E_{\max}} - \frac{ID - OD}{L}\right)}$  可以看作因变量  $Y$ ,  $F_{b-e}$  看作自变量  $X$ ,  $\frac{1}{OD - Z}$  为斜率  $k$ ,  $\frac{D + L}{OD - Z}$  为截距  $b$ , 这样式(5)可以看作一个线性方程  $Y = kX + b$ 。通过改变  $F_{b-e}$ , 可以得到对应的多个  $E_{\max}$ , 通过线性拟合法得到  $k$  和  $b$  进而得到  $Z$  和  $D$ 。

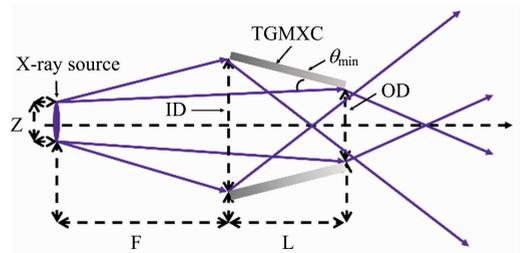


图 2 TGMXC 反射 X 射线原理示意图

Fig. 2 Sketch of principle of reflecting X-rays of the TGMXC

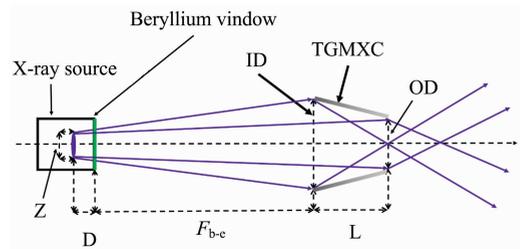


图 3 TGMXC 实际工作原理示意图

Fig. 3 Sketch of the actual operating principle of the TGMXC

### 2 实验部分

#### 2.1 确定 TGMXC 相关参数

设计并制作了一个 TGMXC 用于实验。通过光学显微镜得到出入口直径,参数如图 4 所示。

由式(2)可知,该 TGMXC 的  $F_m$  为 33.6 mm。

为确定该 TGMXC 的修正系数  $C$ , 利用一个已知焦斑尺寸和焦深的微焦斑钨靶光源(L9631 HAMAMATSU, Japan), 该光源焦深为 16.5 mm, 其焦斑尺寸可通过改变功率大小来调节, 关系如图 5 所示。

图 6 是实验系统示意图, 为了准确探测 TGMXC 聚焦射线的能谱, 实验设置了光束阻挡器(Beam stop)来阻挡直通光, 带小孔(直径 0.5 mm)的铅屏蔽板(Lead plate)来阻挡光源发出的未进 TGMXC 的原级光。实验中使用的探测器是硅漂移能谱探测系统 (AXAS-M KETEK, Germany), 利用一个五维调节架来控制调节 TGMXC, 一个三维调节架来控制调节探测系统。

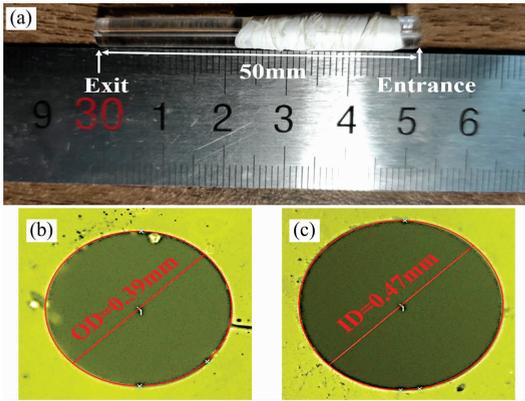


图 4 TGMXC 照片

(a): TGMXC 外形; (b): TGMXC 出口; (c): TGMXC 入口

Fig. 4 Photographs of TGMXC

(a): Outline of TGMXC; (b): Inner exit of TGMXC;  
(c): Inner entrance of TGMXC

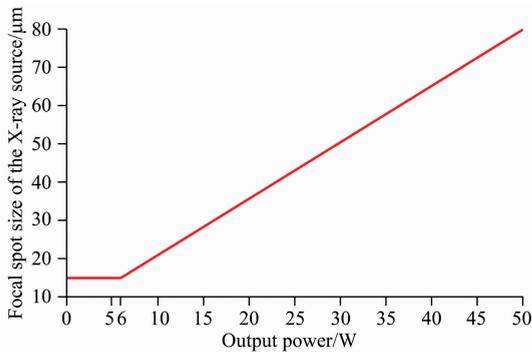


图 5 X 射线光源焦斑尺寸和光源输出功率关系

Fig. 5 Focal spot size of the X-ray source vs. output power of the X-ray source

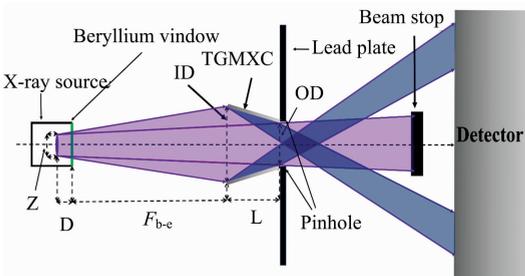


图 6 实验系统示意图

Fig. 6 Sketch of the experimental system

调节光路准直并利用成像探测器 CCD 来确定直通光被完全阻挡。固定  $F_{b-e}$  不变的情况下, 通过调节 X 射线光源功率, 可以获得一个焦斑尺寸  $Z$  并探测到对应的 TGMXC 聚焦射线能谱。如图 7 所示, 将能谱化为对数坐标形式, 进行归一化并去除本底。对计数小于最大计数的  $10^{-3}$  的能量区间取平均值作为该能谱的能量上限<sup>[12]</sup>, 对同一个  $Z$  以相同时长探测六次能谱, 将六个能谱能量上限的平均值作为这个  $Z$  对

应的  $E_{\max}$ 。

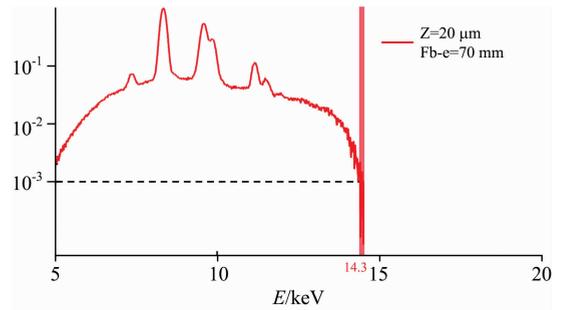


图 7 TGMXC 反射 X 射线的归一化对数坐标能谱

Fig. 7 Normalized energy spectrums of the reflected X-rays of TGMXC on the logarithmic scale

本文保持  $F_{b-e} = 70$  mm, 光源工作电压为 20 kV, 调节输出功率得到 8 个  $Z$  值并分别测量计算出对应的, 结果如表 1 所示。

表 1 8 个不同光源焦斑尺寸 ( $Z$ ) 对应的最大能量 ( $E_{\max}$ ) 计算结果

Table 1 Calculation results of the maximum energy ( $E_{\max}$ ) corresponding to 8 focal spot sizes of the X-ray source

$Z/\mu\text{m}$	$E_{\max}/\text{keV}$
15	14.2
20	14.3
25	14.5
30	14.6
35	14.7
40	14.8
45	15.0
50	15.1

结合式(4)和图 4 可以得到修正系数  $C=1.03$ 。

## 2.2 测量光源焦斑尺寸和焦深

利用一个微焦斑钼靶光源 (MCBM 5020.6B. Mo Germany) 作为测量对象。制造商给出焦斑尺寸约  $60 \mu\text{m}$ , 焦深为 20 mm。如图 7 所示, 测量光源焦斑尺寸和焦深采用与确定修正系数相同的实验系统。设置光源工作电压为 35 kV, 工作电流为  $10 \mu\text{A}$ , 调节光路准直后探测六次 TGMXC 聚焦射线能谱并记录  $F_{b-e}$ 。保持其他条件不变, 通过改变  $F_{b-e}$  并探测对应的能谱, 得到 8 组  $F_{b-e}$  与对应的  $E_{\max}$ , 结果如表 2 所示。

根据式(5)作线性拟合, 得到如图 8 所示结果。

结合图 8 和式(5)可知, 线性拟合的斜率  $\frac{1}{OD-Z} = 3.03$ ,

截距  $\frac{D+L}{OD-Z} = 211.2$ , 从而得到该光源焦斑尺寸为  $60.1 \mu\text{m}$ , 焦深为 19.7 mm。为了验证上述测量数值的准确性, 本文利用直径为  $7.5 \mu\text{m}$  的小孔测量了该光源的相关参数, 测得的光源焦斑尺寸为  $60.3 \mu\text{m}$ , 焦深为 20.1 mm。

表 2 8 组光源铍窗到 TGMXC 入口距离 ( $F_{b-e}$ ) 和对应的最大能量 ( $E_{max}$ ) 计算结果

Table 2 Calculation results of the maximum energy ( $E_{max}$ ) corresponding to 8 distance between the beryllium window of the X-ray source and the inner entrance of TGMXC ( $F_{b-e}$ )

$F_{b-e}/\text{mm}$	$E_{max}/\text{kV}$
200	21.8
250	23.4
300	24.8
350	25.9
400	26.9
450	27.6
500	28.4
550	29.0

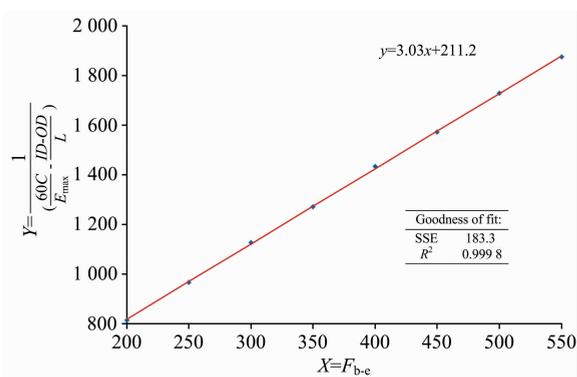


图 8 线性拟合结果

Fig. 8 Result of linear fitting

### 3 结果与讨论

基于 TGMXC 的光源参数表征法在实际应用中产生误差主要来自两方面, 首先是实验仪器的误差, 包括探测器误差和 TGMXC 的面型误差, 准确的定标能谱和增加测量次数可以有效地降低这两种误差。其次是线性拟合过程中产生的误差。对于本文中测量结果而言, 线性拟合的相关系数  $R^2 = 0.9998$ , 是非常接近 1 的, 这说明实际测量值与拟合值相关性很强, 拟合误差是很小的。

由于 X 射线的穿透能力很强, 小孔成像法和多毛细管准直器法很难适应对射线能量高于 40keV 的光源进行参数表征<sup>[7]</sup>。而对于基于 TGMXC 的光源参数表征法而言, 通过改变 TGMXC 与光源距离的大小, 理论上可以实现对射线能量大于 40keV 的光源进行参数表征。通过在 TGMXC 内表面镀膜的方法可以改善 TGMXC 对于高能射线的聚焦能力<sup>[12-14]</sup>, 从而也可以实现对高能射线光源的表征。

### 4 结论

基于锥形单玻璃管 X 射线聚焦镜的表征 X 射线光源参数的方法可以高效而准确的得到 X 射线光源焦斑尺寸和焦深, 相较于现有的测量方法, 由于 X 射线的强穿透性和较小尺寸小孔 ( $\leq 50 \mu\text{m}$ ) 制作难度较大, 该方法对于微焦斑光源的测量有一定的优势, 对表征高能 X 射线光源有潜在的发展与利用价值。

### References

- [1] Bjeoumikhov A, et al. Review of Scientific Instruments, 2005, 76(6): 63115.
- [2] Bjeoumikhov A, et al. Applied Physics Letters, 2005, 86(14): 144102.
- [3] Robinson A, Grimshaw G M. Br. J. Radiol., 1975, 48(571): 572.
- [4] GUO Qing-jiang, WANG Da-chun(郭清江, 王大椿). Atomic Energy Science and Technology(原子能科学技术), 1980, 14(4): 385.
- [5] Romanov A Yu. Measurement Techniques, 2004, 47(7): 670.
- [6] Daniel Roemer. X-Ray Fluorescence With Doubly Curved Crystal Optics. Albany of New York (U. S. A.): University of Albany of State University of New York, 2007.
- [7] SUN Tian-xi, DING Xun-liang, LIU Zhi-guo, et al(孙天希, 丁训良, 刘志国, 等). Atomic Energy Science and Technology(原子能科学技术), 2008, 42(7): 633.
- [8] Dubetsky B, Berman P R. Physical Review A, 1998, 58(3): 2413.
- [9] Song Wei, et al. Journal of Raman Spectroscopy, 2010, 41(9): 907.
- [10] Cornaby Sterling W. The Handbook of X-Ray Single-Bounce Monocapillary Optics, Including Optical Design and Synchrotron Applications. Cornell University, 2008.
- [11] Wang Yabing, et al. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2019, 934: 36.
- [12] Wang Yabing, et al. Optics Communications, 2020, 464: 125544.
- [13] Nakazawa Takashi, et al. Powder Diffraction, 2011, 26(2): 163.
- [14] Matsuura Y, Oyama T, Miyagi M. Appl. Opt., 2005, 44(29): 6193.

# Determination of Parameters of X-Ray Source Based on Tapered Glass Monocapillary X-Ray Condenser

WANG Ya-bing<sup>1,2</sup>, SHAO Shang-kun<sup>1,2</sup>, SUN Xue-peng<sup>1,2</sup>, ZHANG Xiao-yun<sup>1,2</sup>, LI Hui-quan<sup>1,2</sup>, SUN Tian-xi<sup>1,2\*</sup>

1. Laboratory of Beam Technology of Ministry of Education, College of Nuclear Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

2. China Beijing Radiation Center, Beijing 100875, China

**Abstract** The focal spot size and depth of the X-ray source are crucial parameters for X-ray spectroscopy, especially for micro X-ray diffraction and micro X-ray fluorescence. Determining these parameters efficiently and accurately is important for the application and development of the X-ray source. The existing methods for determining these parameters of X-ray source all have their limitations, especially for determining the micro focal spot X-ray source. The tapered glass monocapillary X-ray condenser (TGMXC) is a common X-ray focusing device. According to the filter property and the geometrical characteristics of the TGMXC, the conclusion that the energy upper limit of the focused X-ray of the TGMXC is affected by the focal spot size of the X-ray source can be obtained. The relation between the energy upper limit of the focused X-ray of the TGMXC and the focal spot size of the X-ray source, and the distance between the TGMXC and the focal spot of the X-ray source was proposed. A method of determining parameters of the X-ray source based on TGMXC was designed. Measuring and determining the parameters of the TGMXC and placed the TGMXC in front of the measured X-ray source to form a focusing X-ray path. In the case that the focusing X-ray path is collimated and ensures that only the single reflected focused X-rays, TGMXC is detected, though changing the distance between the X-ray source and the TGMXC and using the energy spectrum detection system to obtain the corresponding focused X-ray energy spectrums. Though calculating and analyzing the energy spectrums, the maximum energy of each spectrum, namely the energy upper limit, is obtained. The focal spot size and the focal depth can be obtained simultaneously using the above relation and linear fitting. Parameters of a micro focal spot X-ray source with a Mo target were determined by this method. The manufacturer gave the focal spot size and focal depth as about 60  $\mu\text{m}$  and 20 mm and were obtained by this method as 60.1  $\mu\text{m}$  and 19.7 mm, respectively. The conventional pinhole imaging method was also used to determine this X-ray source, and the results were 60.3  $\mu\text{m}$  and 20.1 mm, respectively. Compared with existing methods, this method can determine the micro focal spot X-ray source and has potential practical value and development for determining the high-energy X-ray source.

**Keywords** X-ray source; Focal spot size; Focal depth; Total reflection; Tapered glass monocapillary X-ray condenser

(Received Aug. 16, 2020; accepted Dec. 29, 2020)

\* Corresponding author