

狭缝法测量 X 射线管焦点尺寸的研究

李伟伟¹, 王立强^{1,2}, 郑健^{1,2,*}

(1. 清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084;

2. 北京市核检测重点实验室, 北京 100084)

摘要:目前 EN 12543 标准中的狭缝法广泛应用于工业用 X 射线管焦点尺寸的测量和标注。然而所需的测试设备——狭缝相机, 由于其复杂和精密的设计要求, 导致生产加工难度大、成本高且不利于推广使用。本文采用双钨合金圆柱代替狭缝相机, 基于圆柱法中距离和位置参数校准方法, 改进了狭缝法中焦点尺寸测量的计算公式, 研究了不同狭缝大小对 X 射线管焦点尺寸测量的影响和变化规律。实验结果表明, 使用间距与焦点尺寸相当的双钨合金圆柱测量 COMET 公司的 MXR-225HP/11 工业 X 射线管, 也可以获得较为精确的测量结果, 同时实验发现当狭缝宽度较大时, 可以直接用来计算焦点测量装置的几何放大倍数, 并且计算结果与圆柱法中使用距离和位置参数校准方法所测量的结果相一致。

关键词: X 射线管; 狭缝法; 圆柱法; 焦点尺寸

中图分类号: TL99

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2024)02-0498-08

doi: 10.7538/yzk.2023.youxian.0093

Research on Slit Method for Measuring Focal Spot Size of X-ray Tube

LI Weiwei¹, WANG Liqiang^{1,2}, ZHENG Jian^{1,2,*}

(1. Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Beijing Key Laboratory of Nuclear Detection and Measurement, Beijing 100084, China)

Abstract: The focal spot size of X-ray tube is one of the key factors affecting the imaging resolution, and it is also an important index to characterize the working performance of the X-ray source. Typically, after the X-ray tube is manufactured, the focal spot size must be measured and marked. Nowadays, the most widely used measurement standards for X-ray tube focal spot size in the world are IEC 60336, EN 12543, and ASTM E1165. Between various standards, there are differences in the focal spot size measurement methods, scope of application, loading factors and imaging equipment. Among these, the slit method of EN 12543 standard is mostly utilized in industrial X-ray tubes. However, due to its complex and precise design requirements, the test equipment, i. e., the slit camera, is difficult to produce and process, and the cost is high, which is not conducive to promotion and application. This paper studied the influence and variation of the measurement of the focal spot size at different slit sizes by using double tungsten alloy cylinders instead of slit camera. Based on the calibration of

distance and position parameters in the cylinder method, the measurement equipment was conveniently positioned, and the distance between the focal spot and the translation mechanism was measured simultaneously, which improves the position accuracy of the focal spot size measurement. Additionally, the formula for determining the focal spot size in the slit method was improved, so that the slit method can be applied to a wide range of slit widths. In particular, the geometric magnification of the system can be measured directly when the slit width is large, skipping the step of measuring the distance between the focal spot and the translation mechanism. The experiment scheme has low requirements on the centering conditions of the equipment and the distribution of the X-ray source. In the data processing process, dark field correction and bright field correction were used to eliminate the problem of inconsistency in the response characteristics of each detector pixel, and the Wiener Filtering was performed on the signal output by the detector to deal with Gaussian noise and uniformly distributed noise. The experiment results show that relatively accurate measurement values can be obtained by measuring MXR-225HP/11 with double tungsten alloy cylinders with the same spacing as the focal spot size. The measurement relative error is less than 10%. According to international standards, when the measurement results are within plus or minus 10% of the theoretical value, it can be used as a method to determine the focal spot size. Therefore, the improved method in this paper is reliable and does not require high testing equipment, allowing it to be widely used. In addition, the geometric magnification of the focus measurement device can be directly calculated when the slit width is larger than the focal spot size, and the calculation results are consistent with the results measured in the cylinder method.

Key words: X-ray tube; slit method; cylinder method; focal spot size

X 射线管焦点尺寸是影响成像分辨率的关键因素之一,也是表征 X 射线源工作性能的一项重要指标。通常 X 射线管设备出厂前都会对焦点尺寸进行测量和标注。目前国际上比较常用的 X 射线管焦点测量标准有 IEC 60336、EN 12543 和 ASTM E1165。其中 IEC 60336 针对的是医用 X 射线管,EN 12543 和 ASTM E1165 针对的是工业用 X 射线管。不同标准之间,X 射线管焦点尺寸的测量方法、适用范围、加载因素和成像设备均有差异^[1]。经调研,市面上的工业用 X 射线管生产厂商多采用 EN 12543 标准中的狭缝法^[2]和针孔法^[3]进行尺寸检定或现场测量。然而传统方法所使用的测试设备存在加工难度大、制造精度高且价格昂贵等问题,使测试设备难以被推广使用。以狭缝法为例,所需的测试设备——狭缝相机,要求采用钨或类似的具有吸收性能的材料制作,狭缝试块长度和宽度均大于 5 mm,厚度大于

1.5 mm,狭缝初始宽度为 0.01 mm,深度小于 0.015 mm,随着狭缝试块深度的增加,狭缝试块宽度以一定比例线性增大。为此,本文采用双钨合金圆柱代替狭缝相机作为测试设备,通过调节双圆柱之间的间距,研究不同狭缝大小对 X 射线管焦点尺寸测量的影响。

1 狭缝法的测量原理

1.1 测量装置

狭缝法测量 X 射线管焦点尺寸的装置如图 1 所示,直接借助圆柱法^[4]中搭建的测量平台,将两个钨合金圆柱和一个平板探测器安装在一个平移和旋转机构上,安装时保证 X 射线管出射窗、平板探测器和钨柱中心位置大致在同一高度,同时要求两个钨合金圆柱的中心对称面过焦斑中心和探测器中心,且和平板探测器垂直。

图 1 所示的 X 射线管是 COMET 公司生

产的型号为 MXR-225HP/11 的工业 X 射线管,标称电压为 225 kV,采用的是双焦点设计,根据 EN 12543 标准中的针孔法标注,大焦点尺寸为 1 mm,小焦点尺寸为 0.4 mm^[5]。测试设备采用的是纯度为 99.95% 的双钨合金圆柱,直径为 20 mm,高度为 100 mm。成像设备采用的是像素尺寸为 100 μm 的 X 射线动态平板探测器。

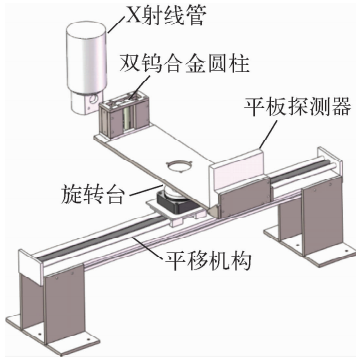


图 1 实验装置图

Fig. 1 Diagram of experimental setup

1.2 测量原理

图 2 所示为狭缝法测量 X 射线管焦点尺寸的示意图,其中钨合金圆柱到平移机构的距离和平板探测器到平移机构的距离相等, $f = 320$ mm;双钨合金圆柱之间的间距可调,大小为 s ;X 射线源到平移机构的距离可通过圆柱法^[4]中的距离和位置参数校准方法测得,大小为 m ;X 射线源焦点尺寸为 d ;平板探测器采集

的亮场宽度为 D 。

根据图 2b 所示的几何关系可以得到:

$$\frac{D}{d} = \frac{2f + \frac{s}{d+s}(m-f)}{\frac{d}{d+s}(m-f)} = \frac{2f(d+s) + s(m-f)}{d(m-f)} \quad (1)$$

传统的狭缝法要求 s 远小于 d ,即 $s/d \approx 0$,则式(1)近似为:

$$\frac{D}{d} = \frac{2f}{m-f} \quad (2)$$

其中 $2f/(m-f)$ 定义为焦点测量装置的几何放大倍数,记为 E 。则 $d = D/E$ 。

当狭缝较宽,不满足传统狭缝法的尺寸要求时,根据式(1)可推导出 d 带有 s 修正的计算公式为:

$$d = \frac{D-s}{E} - s \quad (3)$$

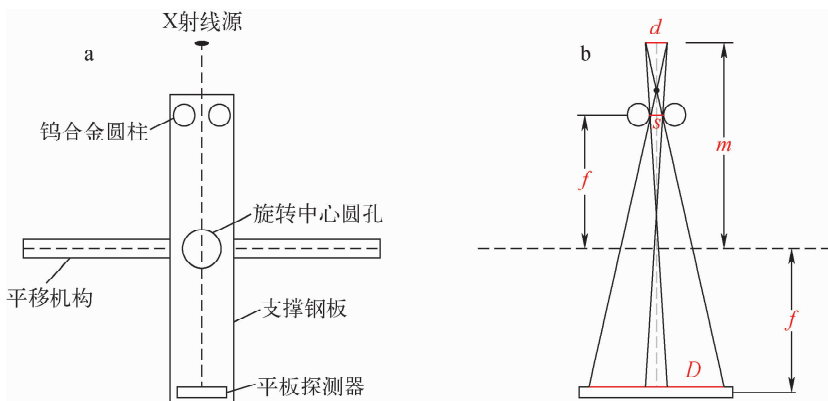
因此根据 D 和 s 以及 E 也可以得到较大狭缝时的 d 。

图 3 所示为利用大狭缝测量焦点测量装置 E 的示意图。其中图 3a 的测试条件为焦点中心与狭缝中心的连线和探测器平面垂直,并且 X 射线源强度分布均匀。图 3b 的测试条件为焦点中心与狭缝中心的连线和探测器平面不垂直,并且 X 射线源强度分布不均匀。

根据图 3 所示的几何关系可以得到:

$$D_M = \left(\frac{2f}{m-f} + 1 \right) \cdot s \quad (4)$$

式中, D_M 为平板探测器采集的亮场平台光强



a——示意图;b——尺寸图

图 2 焦点尺寸测量示意图

Fig. 2 Schematic diagram of focal spot size measuring

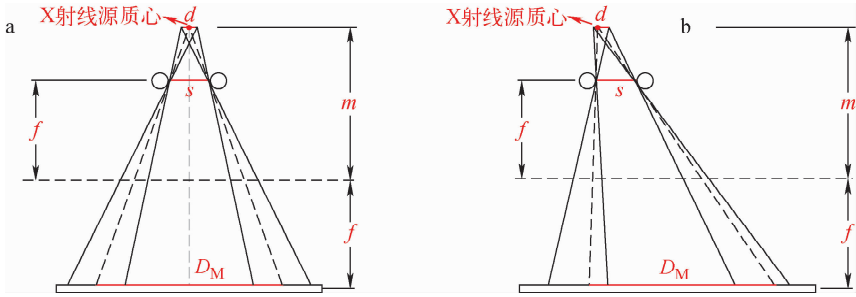


图 3 焦点测量装置几何放大倍数测量示意图

Fig. 3 Schematic diagram of geometric magnification measurement of focus measurement device

的 50% 处的宽度。

根据式(4)可推导出焦点测量装置的几何放大倍数:

$$E = \frac{D_M}{s} - 1 \quad (5)$$

式(5)是从另一个角度对测量装置的 E 进行了表达,省略了测量 m 和 f 的步骤,通过提取平板探测器采集的数据 D_M 结合 s 即可实现对 E 的计算,但是仅适用于 s 较大的情况,因为当 s 大于 d 的 $E/(E+1)$ 倍时,测量亮场中间才会出现平台。由式(5)可知,此时 D_M 与 d 无关,仅与 E 和 s 有关,并且当焦点中心与狭缝中心的连线和探测器平面不垂直(有小角度偏差)时,以及 X 射线源强度分布不均匀时,上述关系依然成立。因此利用大狭缝测量 E 的实验方案对设备的对中条件以及 X 射线源的分布要求不高。

2 实验设计

MXR-225HP/11 X 射线管出厂进行焦点尺

寸标注时,负载为标称管电压的 75%,即 169 kV,因此本文采用狭缝法测量时,管电压设置为 169 kV,管电流经测试设置为 0.5 mA,在减小探测数据统计误差的同时,不超过探测器的饱和计数。

在理想模型中 X 射线源被看作是点源,而实际的焦点具有一定的形状,标准中采用 X 射线管轴线方向上的长度 l 和垂直于 X 射线管轴线方向的宽度 w 来确定 d ,并将所有尺寸(l 或 w)中的较大值作为 $d^{[2]}$,因此在采用狭缝法测量时需要对焦点的长度和宽度分别进行测量。系统设计如图 4 所示,图 4a 为测量焦点宽度的系统布置,保证 X 射线管轴线与水平地面垂直,图 4b 为测量焦点长度的系统布置,保证 X 射线管轴线与平移机构平行。通过圆柱法测量 MXR-225HP/11 X 射线管时发现其焦点长度和宽度尺寸具有一致性,因此在进行狭缝法研究时,仅对其焦点长度尺寸进行了测量。

由式(1)可知,计算 X 射线管 d ,需要测量 m 。然而 X 射线源焦点在光管内部,其位置无

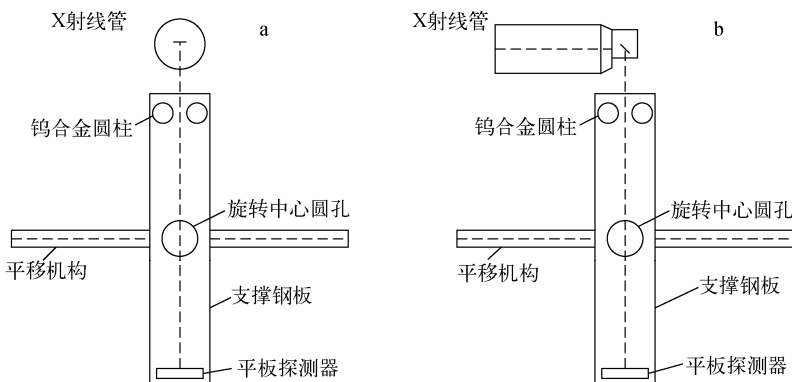


图 4 系统布置图

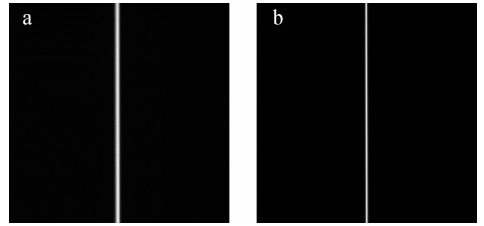
Fig. 4 Schematic diagram of system layout

法通过直接测量确定,而且在进行狭缝法测量时,要求两个钨合金圆柱的中心对称面过焦斑中心和探测器中心,其定位比较困难。李伟伟等^[4]提出的自动校准 X 射线源到平移机构距离及中心初始位置的方法可以解决以上两个问题。该方法通过对任意 3 个不同位置处的单个钨合金圆柱边界进行成像,根据系统的对准要求借助平移机构和旋转机构确定不同位置处系统的相对角度参数和位置参数,然后利用几何关系数值求解得到 m ,同时数值求解得到的角度参数和位置参数可以定位到中心初始位置,即进行狭缝法测量的位置,解决了定位困难的问题。

双钨合金圆柱之间的间距 s 是通过在圆柱之间垫一定厚度的塞尺进行调节的,其中 s 分别设置为 0.02、0.04、0.06、0.08、0.10、0.20、0.30、0.40、0.50、0.60、0.70、0.80、0.90、1.00 和 2.00 mm。

3 数据处理

平板探测器的像素矩阵为 $1\ 280 \times 1\ 280$ 。图 5 所示为狭缝宽度为 0.20 mm 时平板探测器采集的大、小焦点长度方向的灰度图。



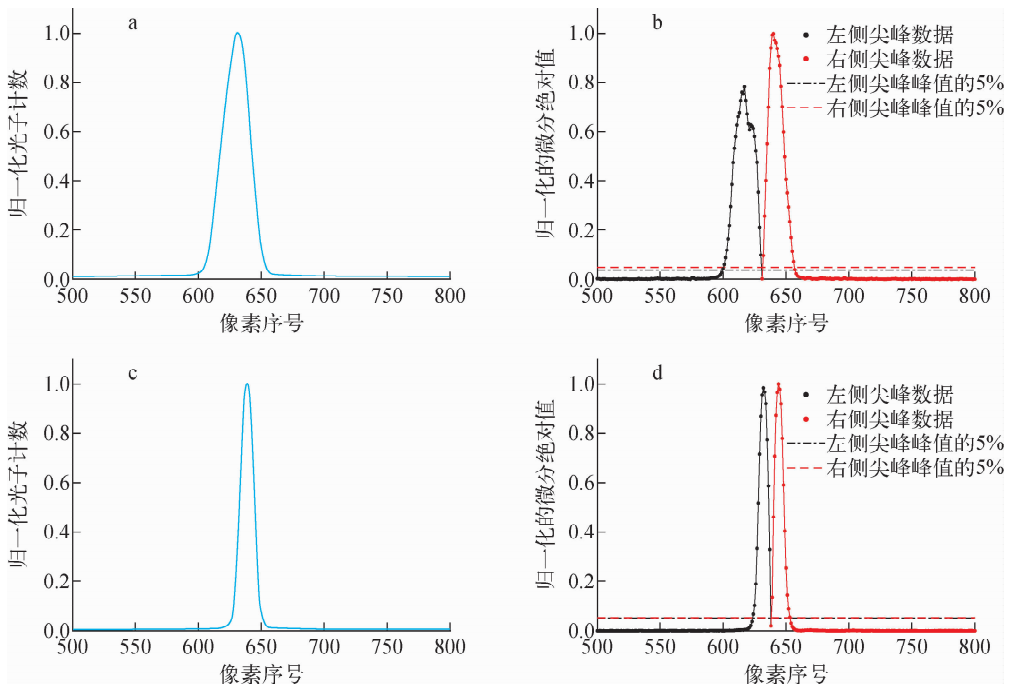
a——大焦点;b——小焦点

图 5 平板探测器信号灰度图

Fig. 5 Signal grey chart of plate detector

平板探测器配套软件有内置的暗场校正和亮场校正模块,实验开始前需要采集亮场数据和暗场数据进行调用,用于消除探测器每个像素点响应特性不一致的影响^[6]。

对平板探测器输出的信号,首先进行二维自适应维纳滤波(邻域 3×3),然后选取沿钨合金圆柱轴线方向第 620~660 路信号叠加取平均,绘制出光强轮廓线。如图 6 所示,狭缝宽度为 0.20 mm 时,数据处理后绘制了大、小焦点长度方向的光强轮廓线和其 1 阶微分曲线,1 阶微分曲线包含两个尖峰。分别取左侧尖峰峰值的 5% 对应的左侧像素序号(3 次样条插值)和右侧尖峰峰值的 5% 对应的右侧像素序号(3 次



a——大焦点的光强轮廓线;b——大焦点的 1 阶微分曲线;c——小焦点的光强轮廓线;d——小焦点的 1 阶微分曲线

图 6 数据处理后的光强轮廓线和其 1 阶微分曲线

Fig. 6 Density profile and its first derivative after data processing

样条插值)之间的长度(间隔的像素数×像素尺寸)作为焦点的 D 。维纳滤波算法不仅计算量比较小,而且对高斯噪声和均匀分布噪声处理效果比较好,在数字图像处理中有着重要的应用^[7]。一阶微分曲线的处理和阈值的选取均是为了消除散射光子的影响。其中 1 阶微分曲线的处理是借鉴了 EN 12543 中边沿法的数据处

理方法;阈值的选取与测量系统有关,通过小焦点对 0.20 mm 宽度的狭缝进行成像,确定了测量系统的阈值为 5%。

图 7 所示为狭缝宽度为 2.00 mm 时,数据处理后绘制的大、小焦点长度方向的光强轮廓线。取光强轮廓线阈值的 50% 的长度(间隔的像素数×像素尺寸)作为 D_M 。

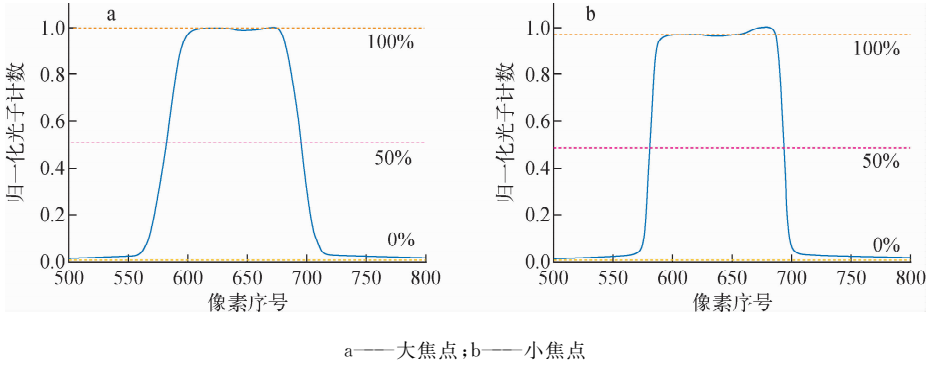


图 7 焦点测量装置几何放大倍数测量数据图

Fig. 7 Data diagram of geometric magnification measurement of focus measurement device

4 结果与讨论

基于圆柱法,对测量 d 的系统布置进行距离和位置参数校准,测得的 m 为 460.23 mm,已知 $f = 320$ mm,根据 $E = 2f / (m - f)$,计算可得测量装置的 E 为 4.56。

4.1 大焦点尺寸的测量

图 8 所示为不同狭缝宽度下大焦点长度方向的光强轮廓线。

场区的宽度和光子数目随之增加,当宽度大于等于 0.90 mm 时,中心出现平顶区。

表 1 所列为采用改进的狭缝法原理得到的大焦点尺寸,其原理是采用式(3)作为 d 的计算公式,并且取光强轮廓线的 1 阶微分曲线阈

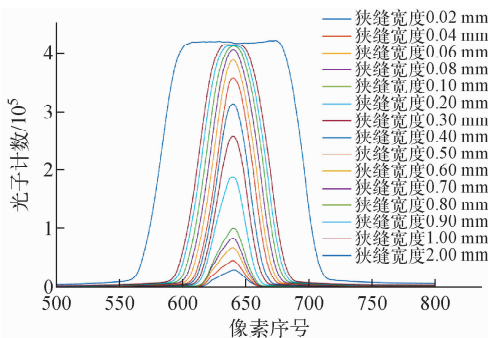


图 8 不同狭缝宽度下大焦点的光强轮廓线

Fig. 8 Density profile of large focal spot under different slit widths

由图 8 可知光强轮廓线呈钟形,中间高,两边低,左右基本对称。随着狭缝宽度的增加,亮

表 1 大焦点尺寸测量值

Table 1 Measurement of large focal spot length

| 狭缝宽度/mm | 间隔的像素数 | 焦点尺寸/mm |
|---------|--------|---------|
| 0.02 | 50 | 1.08 |
| 0.04 | 51 | 1.07 |
| 0.06 | 51 | 1.05 |
| 0.08 | 52 | 1.05 |
| 0.10 | 53 | 1.04 |
| 0.20 | 57 | 1.01 |
| 0.30 | 61 | 0.98 |
| 0.40 | 66 | 0.96 |
| 0.50 | 72 | 0.96 |
| 0.60 | 78 | 0.97 |
| 0.70 | 83 | 0.97 |
| 0.80 | 89 | 0.98 |
| 0.90 | 95 | 0.99 |
| 1.00 | 101 | 0.99 |
| 2.00 | 156 | 0.99 |

值 5% 的长度(间隔的像素数 \times 像素尺寸)作为焦点的 D 。

由表 1 可知,使用改进的狭缝法原理测量大焦点(1.00 mm)尺寸时,随着 s 的增加,其测量值会缓慢减小然后增加,这是因为随着 s 的增加,如图 8 所示光子计数的峰值会随之增加,所以取的阈值长度会随之减小,使得测量值减小。但随着 s 增加,光强轮廓线边沿散射光子计数也会增加。当 s 较小时,散射影响可忽略,光子计数的峰值起主导作用;当 s 较大时,光子计数的峰值增加缓慢,而边沿散射光子计数增加明显,散射影响起主导作用,所以取的阈值长度会随之增加,使得测量值增大。使用改进的狭缝法原理测量大焦点(1.00 mm)尺寸时,狭缝宽度在 2.00 mm 以内均可以获得较为准确的测量值,焦点尺寸测量均值为 1.01 mm,标准差为 0.04 mm。

4.2 小焦点尺寸的测量

图 9 所示为不同狭缝宽度下小焦点长度方向的光强轮廓线。

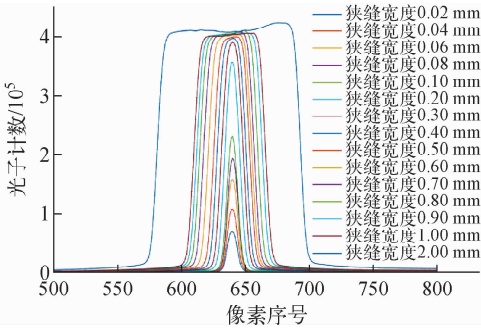


图 9 不同狭缝宽度下小焦点的光强轮廓线
Fig. 9 Density profile of small focal spot under different slit widths

由图 9 可知,不同狭缝宽度下小焦点长度方向的光强轮廓线与大焦点相似,当 s 大于 0.40 mm 左右时,中心出现平顶区。

表 2 所列为采用改进的狭缝法原理得到的小焦点尺寸。由表 2 可知,使用改进的狭缝法原理测量小焦点(0.40 mm)尺寸时, s 在 2.00 mm 以内均可以获得较为准确的测量值,焦点尺寸测量均值为 0.41 mm,标准差为 0.01 mm。结合表 1 可知,改进的狭缝法原理对于不同尺寸的焦点测量具有普适性,且对于

不同狭缝宽度的成像设备具有较好的一致性。

表 2 小焦点尺寸测量值

Table 2 Measurement of small focal spot length

| 狭缝宽度/mm | 间隔的像素数 | 焦点尺寸/mm |
|---------|--------|---------|
| 0.02 | 22 | 0.45 |
| 0.04 | 22 | 0.43 |
| 0.06 | 22 | 0.42 |
| 0.08 | 23 | 0.41 |
| 0.10 | 24 | 0.40 |
| 0.20 | 29 | 0.40 |
| 0.30 | 35 | 0.40 |
| 0.40 | 41 | 0.40 |
| 0.50 | 46 | 0.40 |
| 0.60 | 52 | 0.41 |
| 0.70 | 58 | 0.41 |
| 0.80 | 63 | 0.41 |
| 0.90 | 69 | 0.42 |
| 1.00 | 74 | 0.41 |
| 2.00 | 130 | 0.41 |

4.3 焦点测量装置几何放大倍数的测量

测量 E 时,要求 s 大于 d ,在光强轮廓线上表现为存在平顶区。使用大焦点测量时,由图 8 可知,选用 0.90、1.00 和 2.00 mm 的狭缝宽度。使用小焦点测量时,由图 9 可知,选用 0.50、0.60、0.70、0.80、0.90、1.00 和 2.00 mm 的狭缝宽度。

表 3 所列为在较大狭缝宽度下使用大、小焦点测量得到的 E 。

表 3 几何放大倍数的测量

Table 3 Measurement of geometric magnification

| 狭缝宽度/ mm | 几何放大倍数 | |
|-------------|--------|------|
| | 大焦点 | 小焦点 |
| 0.50 | N/A | 4.68 |
| 0.60 | N/A | 4.70 |
| 0.70 | N/A | 4.69 |
| 0.80 | N/A | 4.70 |
| 0.90 | 4.78 | 4.71 |
| 1.00 | 4.70 | 4.62 |
| 2.00 | 4.67 | 4.62 |

由表 3 可知,使用大焦点测量的 E 的均值为 4.72,标准差为 0.06;使用小焦点测量的 E 的均值为 4.67,标准差为 0.04。当使用大狭缝测量 E 时,其结果具有较好的一致性,但相较于圆柱法中距离和位置参数校准测量结果的平均值偏大 2.79%,这是由于推导 E 的公式时认为进入圆柱的射线被完全遮挡吸收,而实际射线刚切入圆柱时,由于射线穿过的厚度较薄,进入圆柱的射线并没有完全被遮挡,使得光强轮廓线边沿过渡区域略有展宽,使得 D_M 测量值偏大,但偏差不大,若为了简化焦点尺寸的测量步骤,可以使用大狭缝测量的 E 替代圆柱法中距离和位置参数校准的测量结果。

5 总结

传统的狭缝法对测试狭缝的设计要求很高,由于狭缝板厚度较薄(约为 1.5 mm),不适合较高能量 X 射线管的焦点测量(管电压不高于 200 kV)。本文基于圆柱法中距离和位置参数校准方法,对测量装置进行定位,同时测量了焦点到平移机构的距离,提高了焦点测量的位置准确性,也可以通过大狭缝直接测量装置的几何放大倍数,省略了测量焦点到平移机构的距离步骤,然后通过改进的狭缝法原理计算焦点尺寸,当狭缝宽度较大时,狭缝法仍能适用于焦点尺寸测量。实验采用改进后的双圆柱狭缝法在不同狭缝宽度条件下对 MXR-225HP/11 X 射线管 1.00 mm 焦点和 0.40 mm 焦点分别进行测量,结果表明当狭缝宽度较大时,特别是与焦点尺寸相当时,能获得较为精确的测量结果,且焦点一致性较好,测量相对误差在 10% 以内。根据国际标准的要求,当测量结果满足与理论值相对误差在 $\pm 10\%$ 以内时,可以作为鉴定焦点尺寸的方法,因此本文改进的方法具有可靠性,而且对测试设备要求不高,可以推广使用。

参考文献:

[1] 韩放达,肖永顺,常铭,等. X 射线源焦点尺寸测量方法和标准综述[J]. 中国体视学与图像分析,

2014,19(4):321-329.

HAN Fangda, XIAO Yongshun, CHANG Ming, et al. Review of measurement methods and standards of focal spot size of X-ray sources [J]. Chinese Journal of Stereology and Image Analysis, 2014, 19(4): 321-329(in Chinese).

[2] BSI Group. EN 12543-3:1999 Characteristics of focal spots in industrial X-ray systems for use in non-destructive testing, Part 3: Slit camera radiographic method[S]. British: British Standards Institution, 1999.

[3] BSI Group. EN 12543-2:1999 Characteristics of focal spots in industrial X-ray systems for use in non-destructive testing, Part 2: Pinhole camera radiographic method[S]. British: British Standards Institution, 1999.

[4] 李伟伟,王立强,郑健,等. 圆柱法测量 X 射线管焦点尺寸的研究[J]. 原子能科学技术,2022,56(10):2 155-2 164.

LI Weiwei, WANG Liqiang, ZHENG Jian, et al. Research on cylinder method for measuring focal spot size of X-ray tube[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2022, 56(10): 2 155-2 164(in Chinese).

[5] Comet Group. MXR-225HP/11 product description[M/OL]. Switzerland: Comet Holding AG, 2018[2022-09-03]. <https://xray.comet.tech/en/products/mxr-225-hp-11>.

[6] 邝忠华,李兰君,桂建保,等. X 射线探测器 MTF 的狭缝法测量研究[J]. 核电子学与探测技术, 2015,35(8):783-787.

KUANG Zhonghua, LI Lanjun, GUI Jianbao, et al. Study of the MTF measurement for X-ray detector using slit method[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2015, 35(8): 783-787(in Chinese).

[7] 宫威. 基于维纳滤波的图像增强和消噪技术研究[J]. 现代信息科技,2022,6(8):72-74.

GONG Wei. Research on image enhancement and denoising technology based on wiener filtering [J]. Modern Information Technology, 2022, 6(8): 72-74(in Chinese).