

棒阳极 X 射线源聚焦系统的电子光学设计

史丽娜^{1,2}, 刘俊标^{1,2*}, 牛耕¹, 董增雅¹, 邓晨晖¹, 韩立^{1,2}¹中国科学院电工研究所, 北京 100190;²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 棒阳极 X 射线源能够深入到被检物内部进行无损检测,是具有小孔腔特征的金属管壁零部件的可靠性检测的首选方法。具有良好电子光学设计的聚焦系统是棒阳极 X 射线源获得高分辨率检测的关键之一。首先,从电子光学理论出发,结合棒阳极 X 射线源的结构特点建立了聚焦系统模型。然后,优化了聚焦系统模型电子光学参数。最后,搭建了样机,并进行了分辨率测试实验。仿真与实验结果均表明,在 50~130 kV 加速电压下,样机的分辨率优于 50 μm 。

关键词 X 射线光学; 棒阳极; 长工作距离; 电子光学

中图分类号 TN16

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2234001

Electro-Optical Design of Focusing System for Rod-Anode X-Ray Sources

Shi Lina^{1,2}, Liu Junbiao^{1,2*}, Niu Geng¹, Dong Zengya¹, Deng Chenhui¹, Han Li^{1,2}¹Institute of Electrical Engineering Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The rod-anode X-ray source can stick into an object for nondestructive inspection, which is preferred for reliability inspection of the metal tube wall parts with of small cavity. A focusing system with a good electron-optical design is one of the keys to the high-resolution inspection of rod-anode X-ray sources. The focusing system is modeled in terms of the electron-optical theory and the structural characteristics of the rod-anode X-ray source. The electron-optical parameters of this model are then optimized, and the prototype is built for the resolution tests. Both the simulation and experimental results indicate that the resolution of the prototype is better than 50 μm under the acceleration voltage of 50–130 kV.

Key words X-ray optics; rod anode; long working distance; electron optics

1 引言

在工业、航空航天和国防领域中,能源动力转换核心系统里有许多管状、腔体和法兰等金属管壁零部件,这些零部件起着支撑和密封作用且具有小孔腔特征,常处于高温、高压等极端恶劣的工作环境中,其可靠性对系统的安全和性能至关重要。随着我国科技的快速发展和自主国产化程度的提高,这类零部件的可靠性检测和检验成为亟待解决的问题。在我国能源行业检测标准中也规定了这类孔径零件的无损检测方法^[1],其中基于棒阳极 X 射线源的无损检测方法可以对被检物内部细节进行高分辨率成像,是具有小孔腔特征金属管壁零部件可靠性无损检测的首选方法。

与常规微焦点 X 射线源的工作原理一样,棒阳极

X 射线源也是通过聚焦电子束打靶产生 X 射线的。然而,棒阳极 X 射线源在微焦点 X 射线管的基础上从阳极顶端延伸出一段细长的金属管(阳极棒),靶材位于阳极棒的尾部,进而可以将阳极棒深入到具有小孔腔特征的零部件内部,直接检测感兴趣区域,减少了 X 射线的无效穿透厚度,可获得比常规 X 射线源更大的放大倍数和更高的分辨率,从而有利于判断零部件的缺陷。

棒阳极 X 射线源最早是由德国 RTW 公司提出的,目前有两种结构形式,即一种是基于开管的微焦点 X 射线源,另外一种是基于闭管的微焦点 X 射线源^[2]。前者工作电压比较高,可更换阴极棒和阳极棒,应用更为灵活。目前,常用的是基于开管的棒阳极 X 射线源,其产品以德国 WORX 公司为主^[3],阳极棒的直径为

收稿日期: 2022-04-14; 修回日期: 2022-05-11; 录用日期: 2022-05-23

基金项目: 电子束/X 射线共性关键技术研发团队(GJJSTD20200004)、中国科学院电工研究所科研基金(E155440101)

通信作者: liujb@mail. iee. ac. cn

3~80 mm,棒长为 10~1500 mm。在国内,棒阳极 X 射线源的研制工作刚起步,但基于棒阳极 X 射线源的无损检测技术已有了广泛的应用场景,如:张兴梅和潘宗田^[4]利用棒阳极 X 射线源对换热器管子-管板内孔对接焊缝进行了检测;商良等^[5]对硫磺换热器管板焊缝进行了检测;张孝玲和王海亮^[6]利用棒阳极 X 射线源对航空发动机中的机闸焊接组合件进行了检测。因此,开展棒阳极 X 射线源的研究有助于提升我国在这方面设备的自主研制能力。

2 棒阳极 X 射线源聚焦系统的理论分析和优化设计

2.1 棒阳极 X 射线源电子光学特性分析

棒阳极 X 射线源的检测对象一般是壁厚比较大、原子序数较高的金属零部件。随着检测对象的小型化和产品质量要求的提高,棒阳极 X 射线源呈现出长径比大、分辨率高和穿透能力强的检测特点。因此,对于

棒阳极 X 射线源的设计需要同时满足长工作距离、大束流、小焦点和高加速电压要求。目前常规微焦点 X 射线源的分辨率已经达到微米级别,但是棒阳极 X 射线源的分辨率仍在数十微米到数百微米范围内,这主要有两个原因:一是阳极棒长径比大且直径小,其中难以放置聚焦透镜,进而导致几何缩小倍率远大于常规微焦点 X 射线源;二是棒阳极 X 射线源一般需要比较大的电子束束流,进而难以获得更小的焦点 X 射线。

图 1 为棒阳极 X 射线源的结构示意图和电子光路图。如图 1(a)所示,棒阳极 X 射线源主要由电子枪、聚焦系统、阳极棒和靶材组成。在检测时,将阳极棒尾部置于具有小孔腔特征的样品内部,然后 X 射线透过感兴趣区域在探测器上成像。图 1(b)为对应的电子束光路图,其中电子束的交叉斑直径为 d_0 ,束半角为 α ,工作距离(磁透镜下极靴端面到靶面的距离)为 l ,物距(电子枪的交叉斑位置到磁透镜极靴中心的距离)为 u ,像距(磁透镜极靴中心到靶面的距离)为 v 。

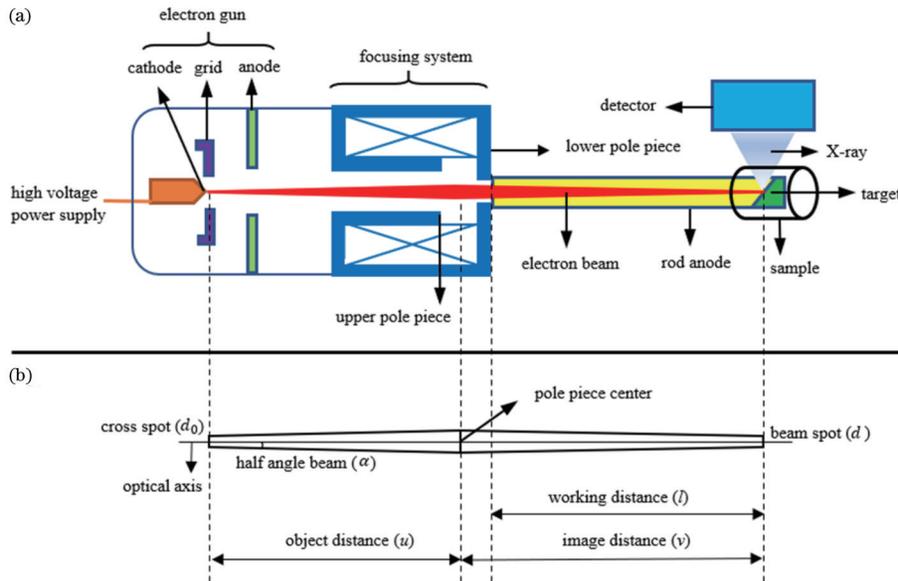


图 1 棒阳极 X 射线源模型。(a)结构示意图;(b)电子束光路图

Fig. 1 Rod anode X-ray source model. (a) Structural diagram; (b) optical path diagram of electron beam

棒阳极 X 射线源电子光学系统主要包括电子枪和聚焦系统两部分,电子枪发射高能电子束,电子束通过聚焦系统后可获得微细束斑的电子束,再利用该电子束轰击靶材产生 X 射线。理论与实践表明:X 射线的焦点尺寸越小,分辨率越高;X 射线焦点尺寸与电子束的束斑尺寸成正比^[7]。为缩小电子束的束斑直径,需要采用电磁透镜进行聚焦。因此,具有良好电子光学设计的聚焦系统是棒阳极 X 射线源获得高分辨率检测的关键之一。

在棒阳极电子光学系统中,由于电子束在高加速电压下轰击靶材,故可以忽略高压波动带来的色差。电子束的束斑直径 d 可表示为

$$d = \sqrt{d_g^2 + d_s^2}, \quad (1)$$

$$d_g = md_0, \quad (2)$$

$$d_s = \frac{1}{2} C_s \alpha^3, \quad (3)$$

$$m = v/u, \quad (4)$$

式中: d_g 为理想高斯像直径; d_s 为球差造成的最小弥散圆直径; m 为聚焦系统的缩小倍率; C_s 为球差系数,其表达式^[8]为

$$C_s = C_{s0}(1+m)^4 = k_s C_{s0}, \quad (5)$$

式中: C_{s0} 为焦点处的球差系数; k_s 为转换系数。

对于棒阳极 X 射线源而言,电子束需要聚焦到靶面上,故可以认为像距等于焦距。与常规微焦点 X 射线源相比,棒阳极的工作距离成倍增加,像距 v 也会随之增加,但磁透镜的物距 u 不变,根据式(4),聚焦系统的缩小倍率 m 会随之增加。此时,根据式(2), d_g 也会相应变大。根据式(3)和式(5), C_s 和 d_s 会急剧增加,从而导致电子束的总束斑直径 d 变大。此外,电子束

会因为更长的光路而损失一部分电子束束流,进而影响了传输效率。

根据上述分析,在长工作距离下,打靶的电子束斑直径将变大。因此,如何保持小束斑直径是棒阳极 X 射线源的一个设计难点。

2.2 聚焦系统的优化设计

棒阳极 X 射线源的电子光学设计需要同时满足长工作距离、大束流、小焦点和高加速电压需求,故需借助磁透镜来实现长工作距离下的高能电子束聚焦。

磁透镜的设计包括极靴、磁路和线包三部分,其中极靴的结构尺寸会直接影响磁透镜的性能。不对称磁透镜可以在相同激励下达到比对称磁透镜更高的磁场强度,且当上极靴孔径 D_1 大于下极靴孔径 D_2 时,像空间场会急剧减小,物空间场会缓慢减小,这有助于减少像差^[9]。因此,选用 $D_1 > D_2$ 的不对称磁透镜。图 2 为工作距离与球差系数之比 (l/C_s) 和加速电压 (V_r) 与透镜激励平方之比 [$V_r/(NI)^2$] 的关系,其中 N 为透镜线圈的匝数, I 为通过透镜线圈的电流。可以发现:当 $V_r/(NI)^2 < 0.03$ 时,极靴间隙 (S) 与极靴孔径 (D) 之比 (S/D) 对 l/C_s 的影响较大;随着 $V_r/(NI)^2$ 的增大,特别是在 $V_r/(NI)^2 > 0.03$ 后, S/D 的变化几乎不会影响到 l/C_s 。因此,对于强聚焦的物镜设计, S/D 值的选择比较重要^[10]。然而,在棒阳极 X 射线源系统中,长工作距离意味着焦距大,对应的透镜激励很小,同时还要满足高加速电压,故 $V_r/(NI)^2$ 会远大于 0.03,此时 S/D 值对 l/C_s 值的影响可以忽略。为了兼顾小工作距离下微焦点 X 射线源模式(强激励模式)的切换, S/D 的值选择为 0.3~0.7,再通过数值计算获得极靴结构尺寸,以满足聚焦系统的性能指标。

磁路的设计直接影响到透镜的饱和程度,上述所有计算和仿真都是在透镜不饱和的情况下获得的。经过设计优化,最终采用如图 3 所示的聚焦磁透镜,其极靴间距为 $S = 4.5$ mm,上极靴孔径为 $D_1 = 12$ mm,下极靴孔径为 $D_2 = 10$ mm, $S/D = 0.41$,磁轭和极靴的材料为高导磁率的电工纯铁 DT4C^[11]。

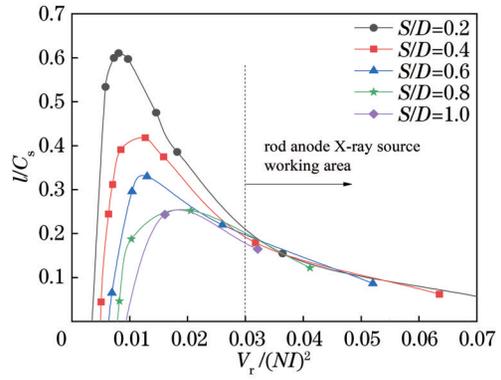


图 2 l/C_s 与 $V_r/(NI)^2$ 的关系曲线图
Fig. 2 Relationship between l/C_s and $V_r/(NI)^2$

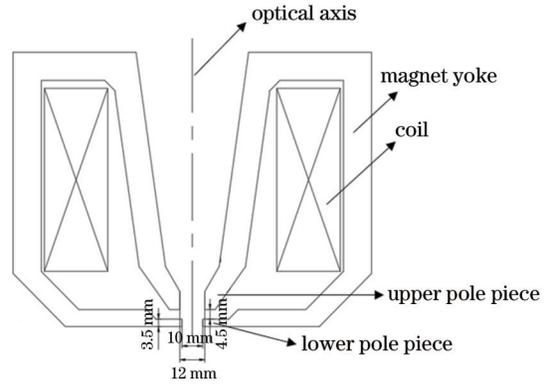


图 3 磁透镜结构图
Fig. 3 Structural diagram of magnetic lens

2.3 仿真计算

由于棒阳极 X 射线源的电子光路长,相比普通微焦点 X 射线源,电子束传输效率低^[12-16],故需要小的电子束发射角(束半角)。因此,选用 LaB_6 作为电子枪的发射阴极,这不仅可以提高发射束流密度,还可以获得比传统钨灯丝更小的电子束发射角,进而有利于提高电子束的传输效率。本文利用 Murno's Electron Beam Software (MEBS) 电子光学计算软件,计算了不同加速电压下电子枪的性能参数,具体如表 1 所示。

表 1 不同加速电压下 LaB_6 电子枪性能列表
Table 1 List of LaB_6 electron gun properties at different acceleration voltages

Accelerating voltage /kV	Grid voltage /V	Cross spot / μm	Position of cross spot /mm	Total beam / mA	Maximum brightness / $(10^5 \text{A} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1})$	Maximum beam half angle /mrad
50	-30	31.50	0.97	0.22	3.28	1.22
70	-42	26.60	0.94	0.37	7.70	1.20
90	-54	23.34	0.93	0.53	11.27	1.20
110	-65	20.86	0.95	0.74	14.01	1.21
130	-67	20.82	0.98	1.21	17.35	1.09
160	-75	19.04	0.98	1.65	22.28	1.06

图 4 展示了聚焦系统磁透镜的位置安排,设阴极尖端位于 0 mm 处,不同加速电压下电子束交叉斑的位置如表 1 所示,磁透镜极靴中心位于 269.45 mm 处,

阳极棒长度为 250 mm。采用 MEBS 软件分别得到磁透镜的轴上场分布、电子束各方向 (x, y, r) 的运动轨迹如图 5 和图 6 所示。图 5 中纵轴 $B(z)$ 为轴上磁场。

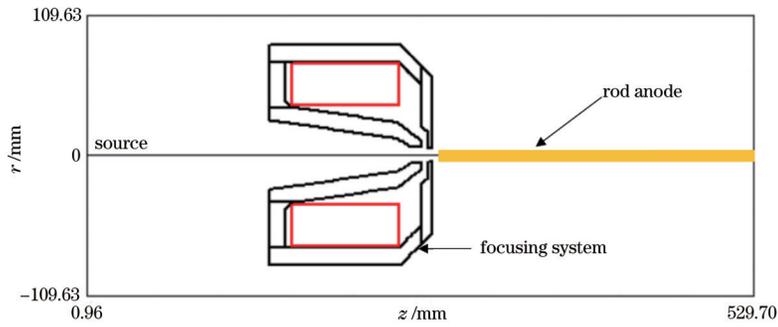


图 4 磁透镜的位置安排

Fig. 4 Arrangement of magnetic lens

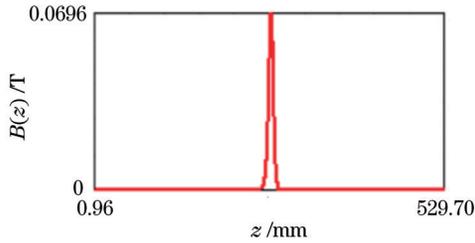


图 5 磁透镜的轴上场分布

Fig. 5 Axial field distribution of magnetic lens

图 6 中 $r_a(z)$ 代表从轴上出发成一定角度出射的电子轨迹, $r_b(z)$ 代表从轴外出发平行出射的电子轨迹, $r_p(z)$ 代表从轴上和轴外出射的两种电子轨迹, $d(z)$ 代表电子束在磁场作用下旋转的角度。

采用图 3 所示的透镜结构参数和表 1 所示的电子枪参数, 计算仿真了焦点位置的电子束束斑与加速电压的关系, 如图 7 所示。可以看出, 束斑直径随着加速电压的增加而逐渐变小, 当加速电压为 50~160 kV 时, 电子束束斑的直径变化范围为 30.66~18.54 μm 。

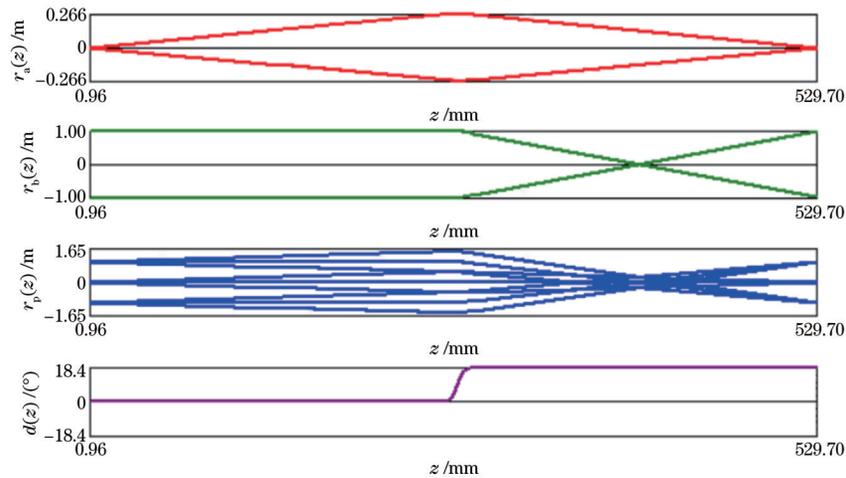


图 6 磁透镜各方向(x、y、r)的电子运动轨迹

Fig. 6 Trajectories of electrons in each direction (x, y, r) of magnetic lens

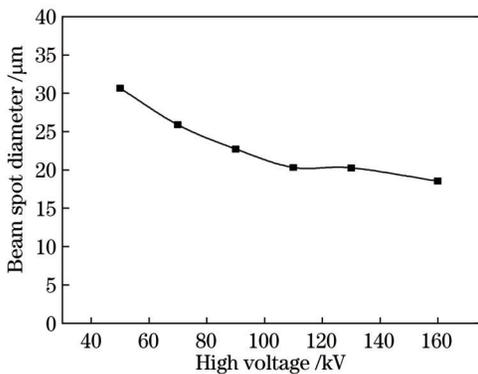


图 7 束斑与加速电压的关系图

Fig. 7 Relationship between beam spot and acceleration voltage

3 实验验证

针对 2.3 节中的仿真, 搭建了如图 8 所示的棒阳极样机进行实验验证, 其中样品放置在靶材与探测器的中间。根据我国能源行业标准规定^[1], 可以通过观察双丝型像质计标准线对的 X 射线图像来测试系统的分辨率。因此, 实验采用 13D-ISO19232-5 型双丝型像质计标准线对进行成像。如图 9 所示, 该双丝型像质计由放置在刚性透明塑料盒中的 13 个线对组成, 每个线对包含两条圆形截面的线, 其中最小的线对线径与间距均为 50 μm 。由于耐压限制, 故实验记录了 50~130 kV 加速电压下所提系统对标准样品的成像情况, 如图 10 所示。结果表明, 在不同加速电压下, 所提系

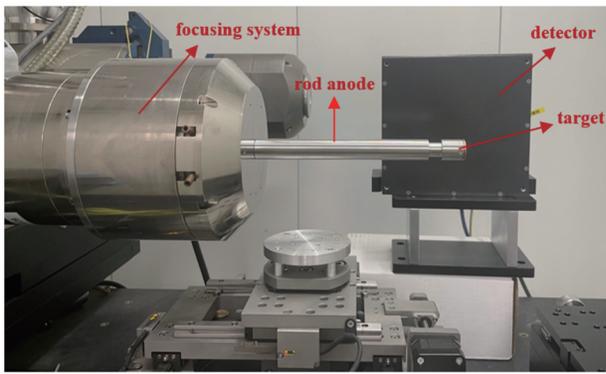


图 8 棒阳极 X 射线源实验平台

Fig. 8 Experimental platform for rod anode X-ray source

统均可以分辨双丝型像质计的最小线对 ($50\ \mu\text{m}$), 验证了该聚焦系统在棒阳极 X 射线源中的适用性。



图 9 双丝型像质计

Fig. 9 Double wire image quality meter

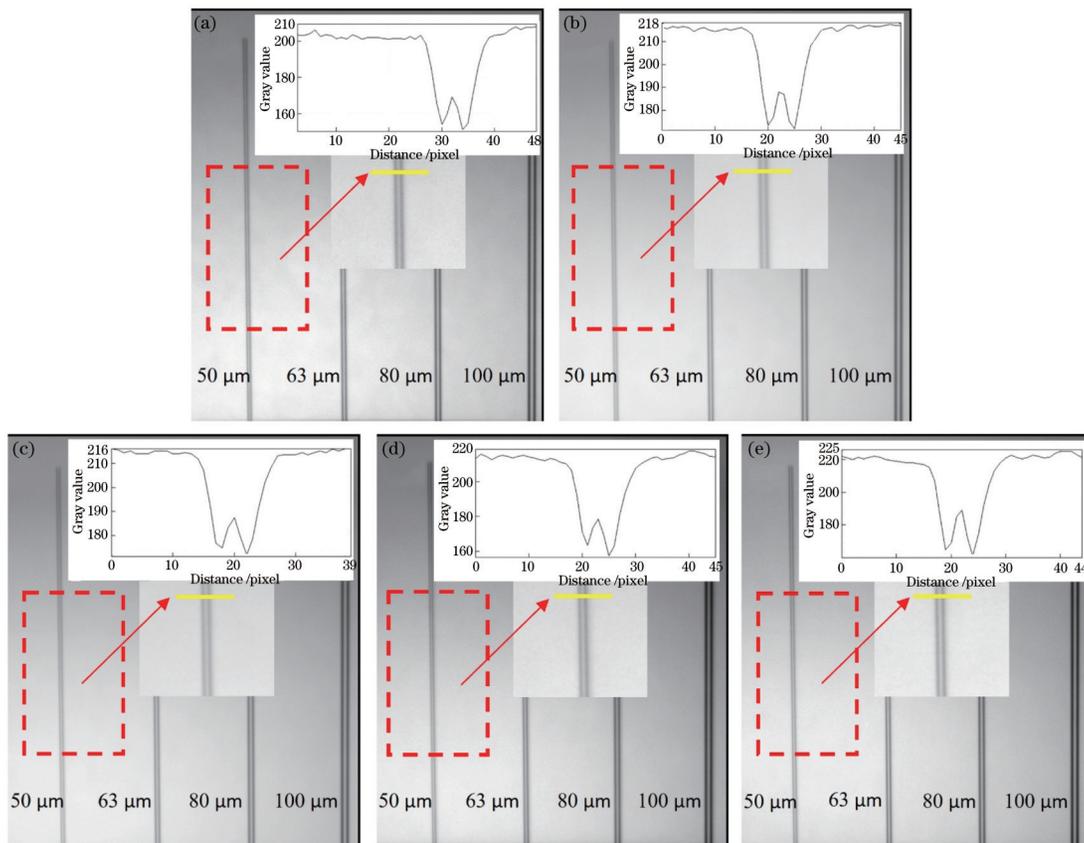


图 10 不同高压下线对成像图。(a) 50 kV; (b) 70 kV; (c) 90 kV; (d) 110 kV; (e) 130 kV

Fig. 10 Line pair imaging at different high voltages. (a) 50 kV; (b) 70 kV; (c) 90 kV; (d) 110 kV; (e) 130 kV

4 结 论

对长工作距离下棒阳极 X 射线源聚焦系统的电子光学开展了分析、计算和模拟仿真工作。在理论分析和仿真结果的基础上, 搭建了样机, 并利用双丝型像质计开展系统分辨率测试实验。结果表明, 当加速电压为 $50\sim 130\ \text{kV}$, 束流为 $200\ \mu\text{A}$ 时, 该样机的分辨率优于 $50\ \mu\text{m}$ 。实验结果在一定程度上验证了仿真结论, 为棒阳极 X 射线源的研制提供了理论和实验基础。

在今后的工作中, 将结合实验结果对现有的计算模型进行进一步优化以提高分辨率。同时, 将对样机进行改进, 提高其工作耐压。此外, 将采用更高分辨率

的标准样品去测试评估样机, 使其能真正应用于国产化关键零部件的无损检测场景中。

参 考 文 献

- [1] 国家能源局. 承压设备无损检测 第 2 部分: 射线检测: NB/T 47013.2—2015[S]. 北京: 新华出版社, 2015. National Energy Bureau of the People's Republic of China. Nondestructive testing of pressure equipments: part 2: radiographic testing: NB/T 47013.2—2015[S]. Beijing: Xinhua Publishing House, 2015.
- [2] Zscherpel U, Ewert U, Rost P, et al. X-ray endoscopy for inspection of tube-to-tube sheet welds in heat exchangers[C]//18th International Probabilistic Safety

- Assessment and Management Conference and the Annual European Safety and Reliability Conference 2012, June 25-29, 2012, Helsinki, Finland. [S.l.: s.n.], 2012, 2: 1703-1708.
- [3] Thorsten FRÖBA, Jens Peter STEFFEN. 航空发动机焊接 X 射线检测用微焦点棒阳极射线管的优化[J]. 无损探伤, 2012, 36(2): 38-40.
FRÖBA T, STEFFEN J P. Optimization of microfocus rod anode ray tube for aero-engine welding X-ray inspection[J]. Nondestructive Testing Technology, 2012, 36(2): 38-40.
- [4] 张兴梅, 潘宗田. 换热器管子-管板内孔焊对接焊缝的棒阳极 X 射线机检测[J]. 无损探伤, 2018, 42(3): 45-47.
Zhang X M, Pan Z T. Bar-anodized X-ray machine inspection of heat exchanger tube-tube plate bore weld butt welds[J]. Nondestructive Testing Technology, 2018, 42(3): 45-47.
- [5] 商良, 张立胜, 兰宦勤, 等. 硫磺换热器管板焊缝棒阳极 X 射线检测技术[J]. 石油化工设备技术, 2016, 37(6): 5, 30-34.
Shang L, Zhang L S, Lan H Q, et al. Detection technology of rod anode X-ray for tube sheet weld in sulfur recovery heat exchanger[J]. Petro-Chemical Equipment Technology, 2016, 37(6): 5, 30-34.
- [6] 张孝玲, 王海亮. 棒阳极微焦点 X 射线机在机匣焊接组合件检测中的应用[J]. 无损探伤, 2016, 40(5): 25-28.
Zhang X L, Wang H L. The application of rod anode X-ray equipment in the inspection of weld assembly of intake casing[J]. Nondestructive Testing Technology, 2016, 40(5): 25-28.
- [7] 王凯歌, 牛憨笨, 郭保平, 等. 一种新型脉冲微束 X 射线源的研究[J]. 光电子·激光, 2004, 15(9): 1011-1015.
Wang K G, Niu H B, Guo B P, et al. Study of portable pulse X-ray sources with micro-beam[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2004, 15(9): 1011-1015.
- [8] 严红, 沈一骑. SEM 工作距离和加速电压对图像分辨率的影响[J]. 实验技术与管理, 2011, 28(9): 44-45, 49.
Yan H, Shen Y Q. Influences of different work distances and acceleration voltages of SEM on image resolution[J]. Experimental Technology and Management, 2011, 28(9): 44-45, 49.
- [9] 西门纪业, 葛肇生. 电子显微镜的原理和设计[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
Ximen J Y, Ge Z S. Principles and design of electron microscopes[M]. Beijing: Science Press, 1979.
- [10] 王丽娟, 刘俊标, 赵伟霞, 等. 高功率密度微焦斑 X 射线源聚焦系统的设计[J]. 电子显微学报, 2019, 38(2): 112-117.
Wang L J, Liu J B, Zhao W X, et al. Design of a high power density micro-focus spot X-ray source focusing system[J]. Journal of Chinese Electron Microscopy Society, 2019, 38(2): 112-117.
- [11] 王之江. 光学技术手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1987.
Wang Z J. Handbook of optical techniques previous[M]. Beijing: China Machine Press, 1987.
- [12] Fontijn L A, Peugeot R S. An operational 150 kV microfocus rod anode X-ray system for non-destructive testing[J]. NDT International, 1978, 11(5): 229-232.
- [13] Fröba T. Rod anode for microfocus X-ray tube utilized for examination of electrical components, has carrier with passage connecting supply channel with discharge channel, where passage runs transverse to longitudinal axis of base body: DE102010054816[P]. 2012-03-08.
- [14] 牛耕, 刘俊标, 赵伟霞, 等. 聚焦电子束对透射式微焦点 X 射线源的影响[J]. 光学学报, 2019, 39(6): 0634001.
Niu G, Liu J B, Zhao W X, et al. Effect of focused bombarding electron beam on transmission microfocus X-ray source[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(6): 0634001.
- [15] 周立伟. 静电聚焦同心球系统的成像电子光学 B 章: 近轴横向色差与几何横向球差[J]. 光学学报, 2022, 42(8): 0811002.
Zhou L W. Imaging electron optics of electrostatic focusing concentric spherical system part B: paraxial lateral chromatic aberration and geometrical lateral spherical aberration[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(8): 0811002.
- [16] 李轲, 刘宾, 王立鹏, 等. 基于多线扫描的 X 射线聚焦成像算法研究[J]. 光学学报, 2020, 40(13): 1311001.
Li K, Liu B, Wang L P, et al. Research on X-ray focusing imaging algorithm based on multi-line scanning [J]. Acta Optica Sinica, 2020, 40(13): 1311001.