高电压迷你焦点 X 射线管开发与应用

阳恩会^{1*} 曹昌伟¹ 郭宗艳¹ 王昌盛¹ 唐志宏^{1,2} 梁宇² 阴怡媛¹ (1. 上海超群检测科技股份有限公司上海 201615; 2. 科罗诺司医疗器械 (上海)有限公司上海 201615)

Development and Application of Mini-Focus High-Voltage X-Ray Tube

YANG Enhui^{1*}, CAO Changwei¹, GUO Zongyan¹, WANG Changsheng¹, TANG Zhihong^{1,2}, LIANG Yu², YIN Yiyuan¹

(1. Shanghai Advanced Inspection Technology Co., Ltd., Shanghai 201615, China;

2. Chronos Medical Equipment (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 201615, China)

Abstract A high-voltage X-ray tube with a mini focal spot is developed, and the high-voltage structure, focusing system, and heat dissipation of the X-ray tube are designed and simulated. At tube voltage 200 kV, the maximum field strength is 17.9 MV/m between the anode and cathode, the focal spot size is 100 μ m, the resolution is 10 LP/mm, and the maximum operating power is 150 W. When applied to an X-ray counting system, the boundary of 01005 electronic components can be clearly distinguished at a magnification of 2 times.

Keywords High voltage, Mini-focus, X-ray tube

摘要 文章对高电压迷你焦点 X 射线管进行研发, 对 X 射线管的高压结构、聚焦系统和散热进行设计与模拟,并完成迷你焦点 X 射线管的制造与应用验证。所设计的 200 kV X 射线光管阴阳极间最大场强为 17.9 MV/m, 焦点 100 μm, 分辨率 10 LP/mm, 最大使用功率 150 W, 应用于 X 射线点料机系统, 放大倍数为 2 倍时可清晰分辨 01005 电子元件的边界。

关键词	高电压	迷你焦点	X 射线管	
中图分类号	号: TN14	文献标识	码:A	doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202411008

X 射线管是工业 DR 和 CT 等 X 射线成像检测 系统的关键核心部件。航空航天、新能源电池、汽 车行业、电子行业等领域复合材料、电池组、模具、 3D 打印部件等零件的微小缺陷在线检测对检测系 统提出的高穿透度、高分辨率、高清晰度和高检测 效率要求,要求 X 射线管具有高管电压、高功率密 度以及更小的焦点(20-200 μm)。

迷你焦点(20-200 μm)X射线管是介于小焦点 (0.3-0.6 mm)与微焦点(20 μm以下)的中间产品。 国内外有部分学者从事此类 X射线管的研究^[1-5],但 主要集中于学术研究的范畴,比如碳纳米管发射材 料在迷你焦点和微焦领域的应用,国内外也有部分 基于碳纳米管的微焦点和迷你焦点 X射线管产品, 但从长期寿命和稳定性而言,还存在一定的不足, 且管电压较低,未达到 160 kV 及以上等级。国内外

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFF0723800)

商业化的迷你焦点管如下表1所示,瑞士 COMET 于 2021年6月推出 225 kV 级别的 Mesofocus 管(焦 点 50、130、200 μm,功率 50、130 和 200 W,取决于 焦点大小),是填补高管电压小焦点(封闭式 X 射线 管)与高管电压微焦点(开放式 X 射线管)之间的空 白焦点范围的新一代产品,但因是金属陶瓷管产品, 价格昂贵。公安部一所通过对设计结构、制造工艺 和工作可靠性方面进行研究,开发出 160 kV 小焦 点 X 射线管^[6]。上海超群公司在国家重点研发计划 项目资助开发的高电压小焦点 X 射线管^[7]基础上, 于 2021年4月成功开发了 160 kV、100 μm 焦点 X 射线管,但更高管电压的迷你焦点 X 射线管,由于 管电压的提升和焦点的缩小,以及功率密度的提升, 导致高压与聚焦设计困难、制造工艺难度高,引起 X 射线管稳定性的不足,国内外尚无 200 kV 及以上

收稿日期:2024-11-18

^{*}联系人: E-mail: ehyang@sandt.com.cn

表1 国内外厂商迷你焦点 X 射线管核心指标对比

Tab. 1 Comparison of core indicators of the mini-focus X-ray tube from domestic and foreign manufactures

X 射线管类型	国别	厂商	型号	管电压/kV	焦点/µm	最大连续功率/W
	英国	Oxford	90507	80	33	56
	意大利	CEI	OX/90	110	50	150
	半団	Superior	SXR130-05	130	70	39
	天凶	Thermo Kevex	PXS10	130	60	40
	德国	Petrick	P030.40.20GW	80	55	50
玻璃 X 射线管	中国	上海超群	UF160	160	100	150
			UF100	100	50	100
			UF80	80	45	100
	下巴	科颐维	KYW500A	50	35	50
			KYW2000AX	50	100	50
		承泰	CT22-0.056-80	80	50	56
金属陶瓷 X 射线管(价格昂贵)	瑞士	Comet	Mesofocus225	225	50	200

管电压的价格适宜的迷你焦点X射线管。本文以 200 kV、100 µm 焦点玻璃 X 射线管为目标, 对此进 行设计与开发,并完成初步应用研究。

高压结构设计 1

为使高电压迷你焦点管在 200 kV 及以上的高 压下能够长期稳定工作,不发生高压打火,阴阳极 距离与阴阳极的结构参数需进行合理设计,本文采 用 Lorentz 电子光学计算软件对所设计的高压结构 进行仿真模拟,仿真结果如图1所示,阴阳极表面之 间的最大场强为17.9 MV/m,小于允许的控制场强 25 MV/m_{\odot}



Fig. 1 Potential distribution between the cathode and anode

2 聚焦系统设计

不同于用于安全检查的常规光斑(0.6 mm 及以 上)X射线管,用于DR或CT成像检查的迷你焦点 X射线管焦点控制对成像系统的分辨率至关重要。 在控制阴阳极距离和结构以满足以上高压结构场 强要求的前提下,同时考虑到灯丝支取电流对灯丝 直径与寿命的影响,对聚焦盘的聚焦尺寸如聚焦深 度、聚焦直径、灯丝槽尺寸,以及灯丝尺寸、灯丝装 配尺寸、阳极靶面位置等影响焦点大小的结构参数 进行设计,采用 Lorentz 电子光学计算软件对所设 计的聚焦结构进行仿真, 靶面电子光斑分布结果如 图 2 所示, 宽度和长度方向都存在一定的杂散电子, 宽度方向计算的靶面电子光斑尺寸(红色虚线内) 为 0.1 mm, 考虑到杂散电子时宽度方向电子光斑尺 寸为 0.26 mm; 不考虑长度方向的杂散电子时, 长度 方向也就是投影方向的电子光斑尺寸约为 0.85 mm, 若靶角控制为 10°,则电子光斑的投影大小为 0.15 mm_o



Fig. 2 Electron distribution of the target surface

对以上电子光斑计算结果设计制造的 X 射线 管, 根据 GB/T 26594-2011 采用小孔成像胶片方法 进行焦点尺寸测试,所采用的放大倍数为2倍,其宽 度方向与长度方向焦点与菲林卡的比对如图 3 所示, 满足 100 µm 焦点要求。图 4 是对所拍摄胶片焦点

的 X 射线管进行分辨率测试的结果, 放大倍数为两 倍, 9 LP/mm 的黑白线条清晰可见, 10 LP/mm 的黑 白线条虽然清晰度下降, 但仍能分辨, 表明所设计 的聚焦系统可满足 10 LP/mm 分辨率要求。从胶片 焦点和分辨率测试结果与仿真计算的电子光斑结 果对比看, 所计算的电子光斑因杂散电子的原因, 比实际焦点大,这可能是杂散的电子光斑相对于集中的电子光斑比例较低,胶片和分辨率卡不敏感所致,但 Lorentz 的模拟结果基本上可作为设计的初始参考依据。后续需要继续优化聚焦参数,消除仿真计算中的杂散电子,并与焦点实际测量结果进行比对校准。



图3 胶片焦点。(a)宽度方向,(b)长度方向 Fig. 3 Focal spot of film. (a) Width direction, (b) length direction



图4 分辨率测量。(a)宽度方向,(b)长度方向 Fig. 4 Resolution measurement. (a) Width direction, (b) length direction

3 散热结构设计

因 X 射线管工作过程中,超 99% 的输入功率 都转换为热,散热设计的好坏直接影响 X 射线管的 高压稳定性与寿命。本文所研究的高管电迷你焦 点 X 射线管,因焦点小、单位面积功率密度高、管电 压高,对 X 射线管的稳定性挑战高,其散热设计尤 为重要。本文对阳极尺寸、阳极散热结构、钨板尺寸、 阳极与钨板衔接等进行设计,采用热模拟软件对设 计的结构进行散热仿真,模拟时不考虑阳极表面的 辐射散热,同时将最大功率全部加载在钨靶上,仿真 结果如图 5 所示,当功率为 100 W 时,钨靶中心最高 温度为 1723℃(图 5a);当功率为 130 W 时,钨靶中 心最高温度为 2222℃(图 5b);当功率为 150 W 时, 钨靶中心最高温度为 2555℃(图 5c),都远低于钨板 的熔点(3410℃),说明所设计的散热结构能够满足 130 W 功率要求,理论上也可满足 150 W 使用要求。

4 X射线管制造与测试

X射线管零部件的去气处理有效性对其高压 与电流稳定性、可靠性和寿命有关键性的影响。高 管电压迷你焦点X射线管由于其电压高、焦点小, 对稳定性的要求更为严苛,而且因其焦点小能承载 的功率低,传统的封泡后电子束轰击阳极靶面对阳 极进行去气的方式已满足不了阳极去气温度要求。 本文针对这一不足,在借鉴现有高管电压小光斑X 射线管生产制造工艺的基础上,开发了新的适用于 迷你焦点X射线管的阳极去气方式与去气设备,所 开发的X射线管如下图6所示,经120小时连续超 高压测试,无打火现象,表明所设计制造的高管电 压迷你焦点X射线管具有较好的稳定性和可靠性。



图5 阳极头温度分布。(a)阳极头温度分布(100 W),(b)阳极头温度分布(130 W),(c)阳极头温度分布(150 W)

Fig. 5 Temperature distribution of the anode. (a) Temperature distribution of the anode (100 W), (b) temperature distribution of the anode (130 W), (c) temperature distribution of the anode (150 W)



图6 200 kV 0.1 mm 焦点 X 射线管 Fig. 6 200 kV X-Ray tube with 0.1 mm focal spot

将所开发制造的迷你焦点 X 射线管装入 X 射 线源,模拟 X 射线管实际使用环境,在强迫循环冷 却条件下进行功率散热试验,在环温 40.6℃、输入 功率 150 W 时,经历热平衡后 X 射线管工作稳 定,解剖发现靶面无熔靶现象,表明设计制造的高 管电压迷你焦点 X 射线管能满足 150 W 使用功率 要求。产品散热能力不低于、甚至优于国外 COMET 的 Mesofous 产品: 130 μm 焦点下 130 W 的使用 功率。

5 应用测试

2022年5月将所开发的迷你焦点X射线管装 入上海超群公司自行开发的X射线源与X射线自 动点料机系统,在功率150W条件下已稳定运行超 过2.5年,用于封装芯片料盘的计数检测,下图7是 01005元件料盘的成像检测结果,放大两倍时元件 的边界清晰可见。应用了本项目迷你焦点X射线 管的点料机系统,常规器件点料计数准确率达到 99.99%以上(优于竞品的99.9%或者与竞品相当) 的同时,因硬件成本的降低,预计价格为现有X射 线点料机价格的60%。自动点料机因具有高稳定、 长寿命、计数准确率高、成本低的特点,入选了工信 部2024年智能检测装备首批创新产品,预期将在电 子行业的数千家中小企业中获得广泛的应用,提高 生产效率。



- 图7 应用于 01005 元件 X 射线点料。(a)整体图像,(b)局部 图像
- Fig. 7 Application to the X-ray counting system of 01005 electronic components. (a) Overall image, (b) local image

6 结论

使用 Lorentz 和散热仿真软件对高电压迷你光 斑 X 射线管的阴阳极高压结构、聚焦系统和散热结 构等进行模拟,并开发适用于迷你焦点 X 射线管的 去气工艺,研制出高电压迷你光斑 X 射线管:管电 压 200 kV、焦点 100 μm、功率 150 W, 经测试其分 辨率为 10 LP/mm,应用于电子元器件点料机系统, 放大 2 倍时 01005 元件边界清晰可见。本项目高管 电压迷你焦点 X 射线管对航空航天、新能源电池、 汽车行业、电子行业等领域零部件的微小缺陷检测 具有明显的应用前景。

参考文献

- [1] Hu J W. Research and development of a reflection-type Xray tube[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015 (胡菁文. 反射式微焦点 X 射线管的整 体研发 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2015 (in Chinese))
- [2] Lei L. Preparation and performance research of carbon nanotube field emission cathode[D]. Chengdu: School of Optoelectronic Science and Engineering, 2021 (雷李杨霞. 碳纳米管场发射阴极的制备及其性能研究 [D]. 成都: 电 子科技大学, 2021 (in Chinese))
- [3] Zhang J, Yang G, Cheng Y, et al. Stationary scanning x-ray source based on carbon nanotube field emitters[J]. Applied Physics Letters, 2005, 86(18): 65
- [4] Liu Z, Yang G, Lee Y Z, et al. Carbon nanotube based microfocus field emission x-ray source for microcomputed tomography[J]. Applied Physics Letters, 2006, 89(10): 62

- [5] Tolt Z L, Mckenzie C, Espinosa R, et al. Carbon nanotube cold cathodes for application in low current x-ray tubes[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena, 2008, 26 (2): 706–710
- [6] Wang Q Z, Xu W P, Sha J T, et al. Novel type of x-ray tube with small focal spot[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2013, 33(7): 670-673 (王奇志, 徐卫平, 沙京田,等. 小焦斑 X 射线管的研究 [J]. 真空科 学与技术学报, 2013, 33(7): 670-673 (in Chinese))
- [7] Yang E H, Guo Z Y, Cao C W, et al. Design and development of high voltage small focal spot x-ray tube[J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2021, 41(3): 301-305 (阳恩会, 郭宗艳, 曹昌伟, 等. 高电压小光斑 X 射线光管的设计与研制 [J]. 真空科学与技术学报, 2021, 41(3): 301-305 (in Chinese))