

· 理论与设计 ·

冷阴极 X 射线管关键部件的设计与仿真

张 扬^{1,2*}, 李振军^{1,3*}, 李元勋^{1,2}, 李 驰¹, 赵立业², 戴 庆¹

(1. 国家纳米科学中心 中科院纳米光子材料与器件重点实验室(筹), 北京 100190;

2. 东南大学 仪器科学与工程学院, 江苏 南京 210096;

3. 广东粤港澳大湾区国家纳米科技创新研究院, 广东 广州 510700)

摘要:利用 CST 粒子工作室软件设计仿真了一种高电子通过率冷阴极微焦点 X 射线管。重点分析 X 射线管阴极结构、栅网和聚焦极的结构与电压、阳极电压等关键因素对电子束聚焦束斑的影响,特别是设计了一种独特的阴极凹槽结构,使阴极电子束发射的散角减小了 21.84°,并使电子枪通过率从 54.3% 增加至 74.59%。在此基础上设计的碳纳米管 X 射线管在阳极电压为 70 kV 时,电子通过率可达到 75%,电子束焦点约为 56 μm ,聚束比为 5 : 1,可为冷阴极微焦点 X 射线管的设计和加工提供参考。

关键词:冷阴极 X 射线管;场致发射;CST 仿真;通过率

中图分类号:TN14 文献标识码:A 文章编号:1002-8935(2022)04-0036-07

doi:10.16540/j.cnki.cn11-2485/tn.2022.04.06

Design and Simulation of Critical Components of Cold Cathode X-Ray Tubes

ZHANG Yang^{1,2*}, LI Zhen-jun^{1,3*}, LI Yuan-xun^{1,2},LI Chi¹, ZHAO Li-ye², DAI Qing¹

(1. National Center for Nanoscience and Technology, CAS Key Laboratory of Nanophotonic Materials and Devices (preparatory), Beijing 100190, China;

2. School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

3. GBA Research Innovation Institute for Nanotechnology, Guangzhou 510700, China)

Abstract: A kind of cold cathode microfocus X-ray tube with high electron transmission efficiency is designed and simulated by CST Particle Studio software. The influences of the cathode structure, the structures and voltages of grid and focusing electrode, the anode voltage and other key factors on focus spot of cold cathode X-ray tube are analyzed. A novel structure of cathode groove was designed to reduce the divergence angle of electron beam emission by 21.84° and increase the electron transmission efficiency from 54.03% to 74.59%. On this basis, an ideal cold cathode X-ray tube is designed, of which the anode voltage is 70 kV, the electron transmission efficiency is 75%, the focusing ratio is 5 : 1 and the focal spot size is about 56 μm . The results can provide reference for the design and fabrication of cold cathode X-ray tubes.

Keywords: Cold cathode X-ray tube, Field emission, CST simulation, Electron transmission efficiency

基金项目:国家重点研发计划纳米科技重点专项(2016YFA0202000);国家自然科学基金面上项目(52072084,51972072);广东省重点领域研发计划项目(2020B0101020002);广东粤港澳大湾区国家纳米科技创新研究院自主立项项目(2020GN0106);北京市高校“实培计划”项目(22150121003/050)

* 张扬和李振军为共同第一作者

X射线管作为医学诊断、无损检测、安全检查等领域相关设备的核心光源部件,其电子束焦斑大小是决定设备成像效果的关键因素之一^[1-4]。目前,市场上的X射线管仍以热阴极为主,基本结构包括阴极、聚焦极和阳极,工作中需要加热、响应速度慢、电子束能量分布宽、难以聚焦^[5]。冷阴极X射线管中电子发射控制方式与热阴极不同,冷阴极在热阴极结构的基础之上增加了栅极,用于控制冷阴极电子发射过程。冷阴极X射线管具有无需加热、响应速度快、阴极面积可控、电子发射方向集中、能量分布窄,易集成等优点,已成为近些年来X射线产品开发研究热点^[6]。

国外对冷阴极X射线管的研究起步相对较早。2001年H. Sugie等^[7]首次将碳纳米管(CNTs)阵列作为场发射电子源用于X射线管,发现产生的X射线照出的图像比用钨丝热激发产生的X射线照出的图像具有更高的清晰度和分辨率。2005年,Z. L. Tolt等^[8]以单片碳纳米管作为冷阴极电子源,研制出的X射线管焦点直径为 $80\ \mu\text{m}$,工作电压为 $25\sim 40\ \text{kV}$;Hyun Suk Kim等^[9]于2015年研制出以多壁碳纳米管为电子源的双聚焦微焦点X射线管;2018年,Sora Park等^[10]制备的微焦点X射线管结合了静电聚焦和磁聚焦,其分辨率下限可达 $0.5\ \mu\text{m}$ 。国内张继君等^[11]于2015年以长 $0.8\ \text{mm}$ 、宽 $0.1\ \text{mm}$ 的“跑道状”碳纳米管阵列为发射体,设计出焦斑尺寸为 $39\ \mu\text{m}$ 的X射线管,但电子通过率为 52% ,尚不理想;2017年,杜小飞等^[12]重点研究了栅网结构对发射电流、阳极电流、电子通过率的影响,并确定了最佳的栅网结构,但未实现对阴极材料电子发射方向的控制;2019年,刘梦龙等^[13]基于CNTs阵列研制了一款大功率X射线管,焦斑尺寸为 $0.24\ \text{mm}\times 0.22\ \text{mm}$;唐华平等^[14]于2020年通过对聚焦极电压的调节实现了可变焦斑的X射线管,其阴极长 $19\ \text{mm}$ 、宽 $4.3\ \text{mm}$,电子通过率为 68.5% 。目前,研究者对于X射线管的设计重点关注的是阴极发射体形状、各电极的尺寸与电压等方面,往往注意单方面的参数和性能,而对于能同时缩小电子焦斑的面积和提高电子通过率的解决方案尚无报道。

X射线管的设计与仿真是其开发的首要技术环节。在众多仿真手段中,CST STUDIO 2020粒子工作室是一款上手简单、操作容易、对电脑配置要求不高的建模仿真工具。它通过空间有限元对电磁场进行划分,并通过控制网格大小,能快速准确地分析

三维电磁场中的带电粒子动力学。它主要专注于电磁场,尤其适用于X射线管的设计和仿真,是初学者常用的仿真软件之一。本文采用CST软件,在对基本结构的设计和仿真的前提下,添加阴极凹槽结构,最终设计出电子焦斑小、电子通过率高的冷阴极X射线管。

1 结构设计

1.1 模型设计

本文设计的冷阴极X射线管整体结构如图1所示,包括阴极、栅极、聚焦极、阳极、电极引线、支撑结构和玻璃外壳等部分。整个结构采用玻璃进行真空密封,电极由金属柱引出,设计中阴极呈椭圆形,阳极靶面倾角预设为 12° 。通过对栅极施加正电压以引出电子束,电子束经过聚焦极聚焦后汇聚于阳极,高速电子束轰击阳极靶面产生X射线。

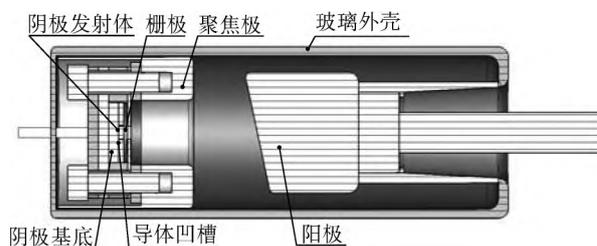


图1 冷阴极X射线管整体结构

1.2 结构参数设置

在仿真过程中逐个扫描各参数,过程中保持其它参数不变,以研究这个参数变化对仿真结果的影响。本文涉及到的冷阴极X射线管参数如表1所示。

表1 模型仿真参数

参数	初始值	参数	初始值
阳极倾角 α	12°	栅网方孔半边长 D_r	$0.2\ \text{mm}$
阳极与聚焦极间距 D_1	$8.25\ \text{mm}$	阳极半径 R_1	$6\ \text{mm}$
聚焦极高度 H_1	$4.95\ \text{mm}$	聚焦极外径 R_2	$7.5\ \text{mm}$
聚焦极与栅极间距 D_2	$1\ \text{mm}$	聚焦孔椭圆短半轴 R_3	$3.1\ \text{mm}$
栅极高度 H_2	$0.3\ \text{mm}$	聚焦孔椭圆长半轴 R_4	$3.6\ \text{mm}$
栅网高度 H_3	$0.1\ \text{mm}$	栅极孔半宽 R_5	$0.2\ \text{mm}$
阴极与栅网间距 D_3	$0.3\ \text{mm}$	栅极孔半长 R_6	$0.7\ \text{mm}$
阴极高度 H_4	$0.5\ \text{mm}$	阳极电压 V_a	$70000\ \text{V}$
阴极基底高度 H_5	$1\ \text{mm}$	聚焦极电压 V_f	$0\ \text{V}$
栅网孔中心间隔 D_g	$0.45\ \text{mm}$	栅极电压 V_g	$2000\ \text{V}$

1.3 仿真条件设置

(1) 材料定义:仿真中阴极、栅极、聚焦极和阳

极均为 PEC 材料(完美导体),其余不导电部分定义为玻璃,背景材料定义为真空。

(2) 电势设置:阴极为发射源,设置阴极电势为 0。栅极部分需要施加正电压使阴极表面的势垒降低并使电子发射,预设栅极电压为 2000 V。聚焦极电压预设 0,阳极电压预设 70 kV。

(3) 发射源设置:CST 粒子工作室中含六种粒子发射模型:固定发射(Fixed Emission)、空间电荷限制(Space Charge Limited)、等离子体鞘层发射(Plasma Sheath Emission)、热发射(Thermionic)、场致发射(Field-induced)、光致电子发射(Optically Induced)。本文中 X 射线管采用冷阴极场致发射模型,设置粒子源为面源且位于阴极上表面。理想条件下,场致发射模型发射表面的电流密度由 Fowler-Nordheim 公式给出:

$$J = a E^2 \exp(-b/E)$$

式中, a 和 b 是与材料的功函数和表面形状相关的特定常数, E 为电场的绝对值, J 为电流发射密度。 a 、 b 参数经过实验数据拟合而来,根据实验测试碳纳米管阴极发射数据得到 $a = 0.8 \times 10^{-11} \text{ A/V}^2$, $b = 6.9 \times 10^6 \text{ V/m}$ 。粒子密度设置为适应网格尺寸。

(4) 网格设置:网格的大小在仿真过程中不但会影响到仿真的精度,而且会影响计算的时间。本次仿真整体结构采用自动划分六面体网格,对阴极发射体网格进行手动加密,网格在 x, y, z 方向上使用绝对步长 0.01 mm,并加密阴极周围的网格,除此之外,对全局最大网格进行限制,远离模型和靠近模型网格的绝对值均设置为 0.5 mm。整体结构网格划分如图 2 所示。

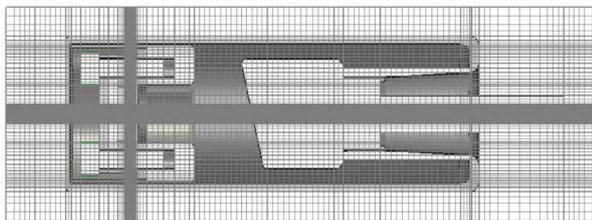


图 2 整体结构网格划分

(5) 边界条件:仿真过程中计算只在一定的边界范围内执行,故需要在每一个坐标轴设置一定的范围将模型包围在内。冷阴极 X 射线管仿真过程中,将所有的边界面的条件均设置为开放状态。

(6) 求解器设置:完成对模型的设置后即可设置粒子追踪求解器开始对模型的仿真。设置求解器的粒子源,求解过程采用低频模式。跟踪求解器不

仅仅是通过计算域跟踪粒子一次,而是求解器迭代地重复静电计算,然后跟踪粒子,直到达到两个连续迭代之间空间电荷偏差的期望精度。通过启用迭代选项来激活迭代枪求解器算法,并设置相对精度为 -20 dB,迭代次数为 20。跟踪场框列出了粒子跟踪求解器可用的所有电场,选择 E-static 即可。

2 仿真结果

2.1 焦点的定义

X 射线管的焦点尺寸是影响 X 射线成像检测系统分辨率的关键因素之一。X 射线的焦点分为实际焦点和有效焦点,两者关系如图 3 所示。实际焦点是指电子束在阳极靶上的轰击面积,有效焦点为实际焦点在垂直于 X 射线管方向上中心处的投影^[15]。本文计算有效焦点尺寸 d ,在计算焦点 X 方向长度 a 和焦点 Y 方向长度 b 时, a 按实际长度得出, b 为 Y 方向实际长度乘 $\sin\theta$, θ 为阳极靶面倾角。有效焦点尺寸 d 根据行业标准《NBT 47013.2-2015 承压设备无损检测 第 2 部分:射线检测》长方形、椭圆形焦点计算方法计算,即有效焦点尺寸 $d = (a + b)/2$ 。

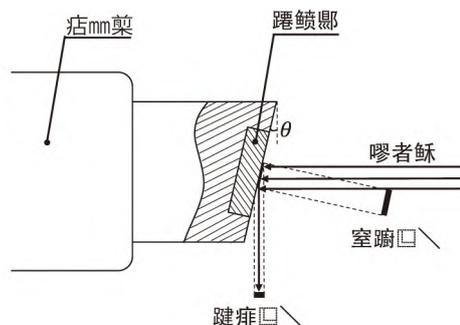


图 3 实际焦点与有效焦点关系

2.2 阴极凹槽对通过率的影响

电子通过率越高,阳极截获的电子越多,产生的 X 光效果越好,所以高精度 X 射线管应该要有一个较高的电子通过率。未增加凹槽时 X 射线管中阴极电场分布特点如图 4(a)所示,阴极周围电场分布不均导致阴极附近电子出现发散的情况如图 4(e)所示。为了尽可能提高电子通过率,通过在阴极材料周围增加导体凹槽,让导体凹槽和阴极材料形成等电位体,使得阴极材料近似处在一个平板电场之间如图 4(b)所示,电子得以近似地垂直于材料表面发射,如图 4(f)所示。

未增加凹槽时,经过阴极发射的 3370 个电子,有 1821 个电子被阳极靶截获,有 1549 个电子被栅极截获,电子通过率为 54.03%。增加凹槽后,有

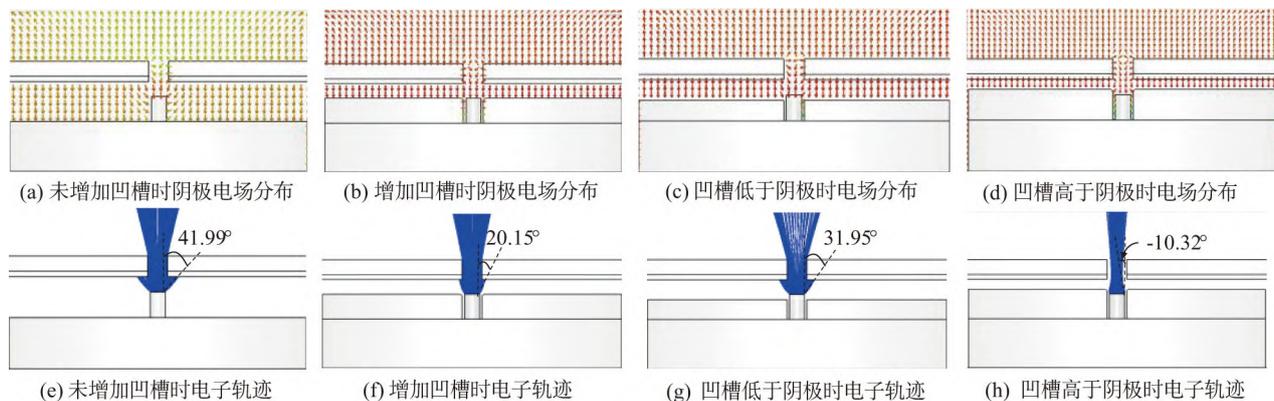


图4 阴极凹槽对电场和电子轨迹的影响

2514 个电子被阳极截获,有 856 个被栅极截获,通过率为 74.59%。增加凹槽后栅极电子通过率增加 20.56%,电子的发散角变小 21.84°,被栅极截获的电子变少,更多的电子朝着阳极靶面发射。凹槽低于阴极 $0.1 \mu\text{m}$ 时阴极附近的电场线分布与电子束轨迹如图 4(c)、(g)所示,阴极发射体周围附近的电场线仍呈现略微弯曲状态,电子束发散角相对于图 4(e)减小了 10° ,经过阴极发射电子,有 2101 个电子被阳极靶截获,有 1269 个电子被栅极截获,电子通过率为 62.34%。凹槽高于阴极 $0.1 \mu\text{m}$ 时阴极附近的电场线分布与电子束轨迹如图 4(d)、(h)所示。从图中可以看出,阴极发射体周围的电场线垂直于导体凹槽,该电场对经过发射后的电子起汇聚作用,使电子束经过栅极时仅被栅丝截获,其中有 2835 个电子被阳极截获,有 535 个被栅极截获,通过率为 84.12%,电子束经过栅极时轨迹向内收缩。凹槽高于阴极时会削弱碳纳米管的尖端效应,在实际发射过程中会减小阴极表面的发射电流。

2.3 栅极对通过率和电子束形状的影响

栅极的厚度和电压、栅极是否有栅网及栅网孔径的形状和大小、栅极与聚焦极间距和栅极与阴极间距都会对电子通过率、阳极的焦点尺寸有不同程度的影响。杜小飞等^[12]提到减小栅网栅丝的宽度会提高电子通过率。为保证栅极栅网有较高的通过率应尽量减小栅丝的宽度,考虑到加工工艺,仿真过程中将栅网栅丝设置为 0.05 mm 并保持不变,在参数变化过程中栅网孔中心间隔为 $D_g = 2D_r + 0.05$ 。

栅网有四边形、六边形等孔状,本文主要研究四边形的孔对电子通过率和焦点的影响,栅网结构如图 5(a)所示,仿真时保证其余结构参数不变,研究栅网孔径与电子通过率、焦点尺寸的关系。栅网孔径与电子通过率的关系如图 5(b)所示,栅网矩形孔径越

大电子通过率越高,当栅网孔径半边长达到 0.26 mm 后,电子通过率变化变得不明显。随着栅网孔径增加,由于阴极发射体面积较小,栅网栅丝在阴极发射面正上方的投影面积越来越小,电子经过栅网时不易被栅丝截获,故电子通过率随着栅网孔径的增加而增加。由于栅网中心部分栅丝投影始终位于阴极中心,电子始终有部分会被栅丝截获,电子通过率不会无限制增加。有效焦点尺寸 d 随着栅网孔径变化趋势如图 5(c)所示,由图可以看出有效焦点尺寸随着栅网孔径的增加而增加。由于栅网栅丝为高电位,阴极为低电位,当栅网孔径增加时部分投影位于阴极边缘的栅丝逐渐远离阴极边缘,电子从低电位向高电位运动,故有效焦点尺寸会增加。

栅网边缘尺寸与电子通过率、阳极焦点形状的关系如图 5(d)、(e)所示。由图 5(d)可以看出,栅极边缘尺寸 $2R_5 = 0.3 \text{ mm}$ (即与阴极短轴方向值相同)时电子通过率较低。栅极边缘尺寸较小时,电子不但会被栅丝截获,而且还会被栅网外围部分截获,随着栅网边缘尺寸增大,电子仅被栅丝截获,栅丝在阴极发射面的投影保持不变,故电子通过率先增加而后保持不变。由图 5(e)可以看出电子经过聚焦极而发生偏转,当 $R_5 = 0.9 \text{ mm}$ 时,焦点短轴方向存在一些杂散电子, $R_5 = 0.3 \text{ mm}$ 时,这些杂散电子由于栅极边缘尺寸减小而汇聚。故在保证合适的电子通过率的条件下,通过适当减小栅网边缘的尺寸可以消除阴极外围杂散电子。

栅极的厚度与电子通过率、阳极焦点的关系如图 6(a)、(b)所示。增加栅极厚度降低了电子通过率,这是由于增加栅极厚度后电子束通过栅极的时间变长,电子束外围电子更容易被栅极内壁截获。虽然通过率有所减小,但电子束经过聚焦极时更容易被聚焦,故有效焦点尺寸会变小。

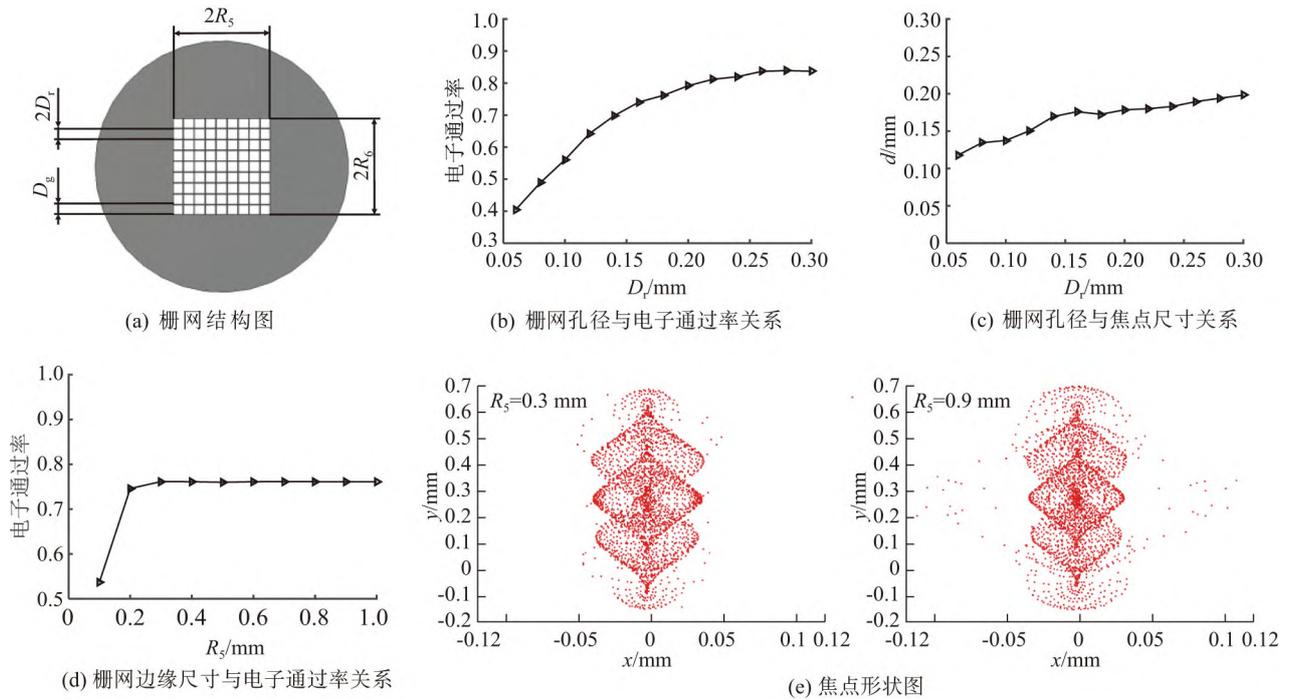


图5 栅网对电子通过率和焦点形状的影响

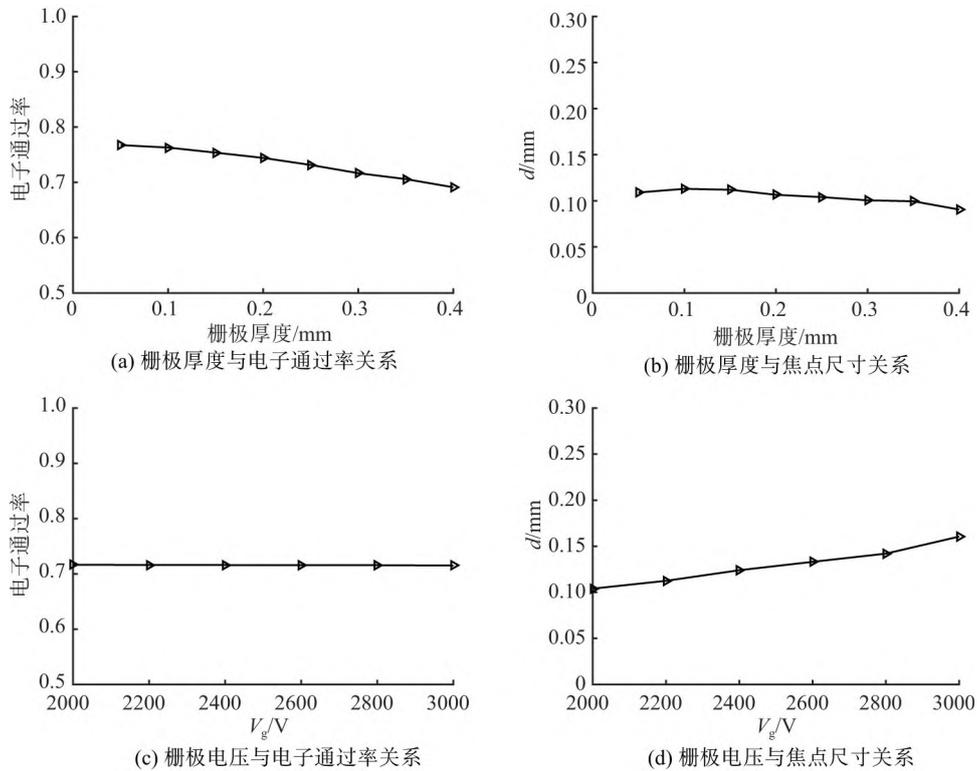


图6 栅极厚度、电压对电子通过率和焦点尺寸的影响

栅极电压不仅影响阴极发射电流的密度,还会影响到阳极焦点的大小,过小的栅极电压会导致阴极的电子无法越过材料表面的势垒,降低阴极发射电流,过大的栅极电压会增加栅极与阴极、聚焦极的绝缘难度,严重还会导致阴极烧毁。本文研究栅极

电压与电子通过率、阳极焦点大小时选取栅极电压范围为 2000~3000 V,其关系如图 6(c)、(d)所示,随着栅极电压增加电子通过率变化不明显,但有效焦点尺寸随着栅极电压而线性增加。

通过仿真栅网的孔径、栅网边缘尺寸,发现由于

栅网的存在,整个电子束经过栅网后被切分为多束,多束电子经过聚焦极后分别聚焦并在阳极形成多个焦点。当栅极电压为 2000 V 时,栅极孔的尺寸为 0.4 mm、栅网边缘长 0.4 mm、宽 1.4 mm、栅极厚度为 0.3 mm 时,可以使电子焦斑短轴方向达到 40 μm ,但电子焦斑的长轴方向尺寸为 160 μm ,造成阴极椭圆长轴方向聚焦困难。去除栅网栅丝后,电子焦斑短轴为 60 μm 、长轴为 52 μm ,有效焦点尺寸为 56 μm ,形状近似圆形。

2.4 聚焦极电压和几何形状影响

图 7(a)为聚焦极电压与有效焦点尺寸关系,随着聚焦极的电压由小变大,有效焦点尺寸先变小而后变大,在 -100 V 时有效焦点尺寸最小。聚焦极

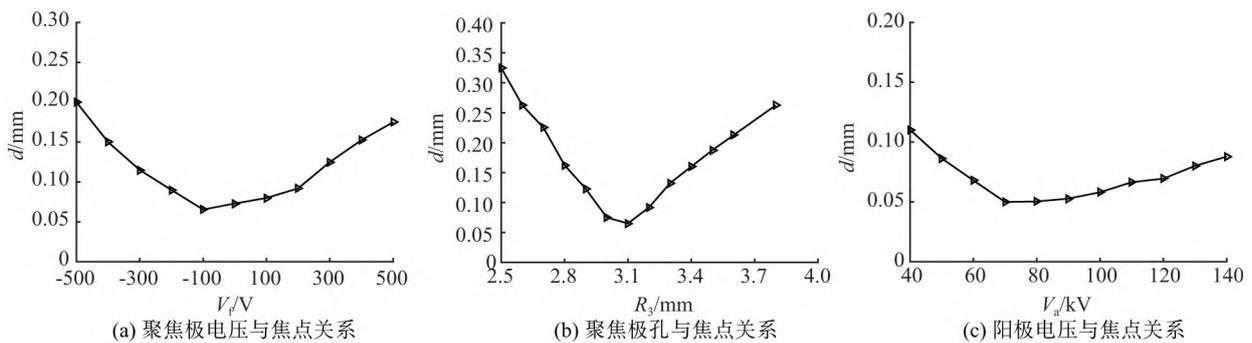


图 7 聚焦极、阳极对焦点的影响

2.5 阳极电压影响

在仿真的过程中,保持 X 射线管各部分的结构不变,仅改变阳极电压,得到阳极电压与有效焦点尺寸关系如图 7(c)所示。由图可知,在阳极电压由 40 增加至 140 kV 过程中,有效焦点尺寸呈先减小后增大趋势。当阳极电压不断增加时,电子汇聚的最小点不断向阳极靶面移动,有效焦点尺寸越来越小;当阳极电压超过某一值,电子汇聚的最小点已经超过阳极靶面,有效焦点尺寸越来越大,而阳极电压太大在使用中会出现击穿、放电的现象。

3 分析及讨论

本文利用 CST 粒子工作室,通过对各个基本结构的电压及尺寸等参数进行仿真,发现栅极电压越小,电子焦斑的面积越小,但过小的栅极电压会导致电子无法有效激发,在仿真中,选取栅极电压为 2000 V,此时电子焦斑短轴直径为 40 μm ,长轴为 160 μm 。聚焦极孔的尺寸、电压都是以抛物线的趋势影响有效焦点尺寸,并存在一个极值点。通过仿真确定了聚焦极椭圆孔的短半轴为 3.1 mm,长半轴为 3.6 mm。在这种情况下,电子汇聚点处在阳

电压会影响电场的分布,电压越大,会使得电子束偏向聚焦极,甚至会让电子打到聚焦极上,导致电子分散,有效焦点尺寸变大;聚焦极电压太小,电子无法通过聚焦极,反而会返回到栅极上。

在不影响通过率的情况下,修改聚焦极孔的形状,保证聚焦极孔椭圆长半轴始终为 3.6 mm,修改聚焦极孔椭圆短半轴 R_3 ,在 R_3 由 2.5 增加至 3.8 mm 的过程中,有效焦点尺寸变化如图 7(b)所示。仅改变聚焦极孔的形状也会对有效焦点尺寸产生较大的变化,由于阴极形状为椭圆,有效焦点尺寸最小时,聚焦极孔为椭圆孔,此时聚焦极孔椭圆短半轴为 3.1 mm,长半轴为 3.6 mm。这说明不同形状的阴极材料,与之对应的最佳聚焦孔也是不一样的,需要通过仿真才能确定。

极靶面中心,有效焦点尺寸最小。

同时,采用阴极凹槽结构可以有效提高电子通过率,增加栅极厚度为 0.3 mm、减小栅网边缘尺寸,优化后栅极孔的宽 $2R_5 = 0.4$ mm,长 $2R_6 = 1.4$ mm,可以有效地汇聚电子束外围电子,去除栅丝可以降低阳极靶面长轴方向尺寸。

基于以上仿真与分析,本文设计的 CNTs 冷阴极 X 射线管阴极为短轴 0.3 mm、长轴 1.3 mm 的椭圆状实体,增加阴极凹槽结构,栅极为矩形孔,去除栅丝,并适当增加栅极厚度,最终在阳极靶面得到 X 轴方向长度为 60 μm 、Y 轴方向投影后 ($250 \mu\text{m} \times \sin 12^\circ$) 长度为 52 μm ,有效焦点尺寸为 56 μm 的微圆焦点,聚束比达 5:1,电子通过率为 75%。电子束轨迹和阳极焦点形状如图 8 所示。

4 结论

本文利用 CST 粒子工作室建立冷阴极 X 射线管的整体模型并对电子束轨迹进行模拟,通过对栅网、聚焦极结构和电压进行调整,实现了冷阴极 X 射线管的焦点优化设计。冷阴极 X 射线管焦点的形状、尺寸会受栅极和聚焦极形状、尺寸和电压的影

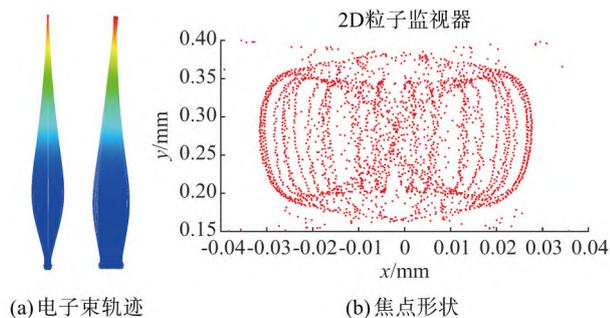


图8 电子束轨迹和焦点形状

响,通过减小栅极边缘尺寸,增加栅极厚度,为减小有效焦点尺寸提供了一种调控方法。电子通过率受栅网的孔径、栅极边缘尺寸和栅极厚度的影响,增加栅极厚度,减小栅极边缘尺寸能有效截获或汇聚电子束外围杂散电子。不同形状的阴极材料所对应的聚焦极孔的形状也不同。通过在阴极材料周围增加凹槽结构,使得电子通过率从 54.03% 增加至 74.59%。上述关键部件的设计与仿真结果可以为冷阴极 X 射线管的设计和加工提供有效参考。

参 考 文 献

- [1] 向东生,王爽,靖开渝,等. 胸部移动床旁 CR 与 DR 摄影技术应用的探讨[J]. 中华肺部疾病杂志(电子版), 2019,12(06):760-761.
- [2] Van Allen H W. Use of Inferior X-Ray Tubes[J]. JAMA: The Journal of the American Medical Association, 1906,(07): 49-49.
- [3] 荣吉萍. 工业检测和安全检查用 X 射线管的现状与发展[J]. 真空电子技术,2015,(01): 42-45.
- [4] Alexander Chepusov, Alexander Komarskiy, Sergey Korzhenevskiy, *et al.* Application of Carbon Materials for Creation of X-ray Sources Cathodes[J]. Materials Today: Proceedings, 2016,(03): 246-251.
- [5] 田丰,胡海洪. 国内 X 射线管应用与发展探讨[J]. 真空电子技术,2015,(01):46-50.
- [6] Fowler H, Nordheim L. Electron Emission in Intense Electric Fields[J]. Proceedings of the Royal Society of London A, 1928, 119(781): 173-181.

- [7] Sugie H, Tanemura M, Filip V, *et al.* Carbon Nanotubes as Electron Source in an X-Ray Tube[J]. Applied Physics Letters,2001,78(17):2578-2580.
- [8] Zhidan Li Tolt, Chris Mckenzie, Robert Espinosa, *et al.* Carbon Nanotube Cold Cathodes for Application in Low Current X-Ray Tubes[J]. Journal of Vacuum Science & Technology B, 2008, 26(02):706-710.
- [9] Hyun Suk Kim, Edward Joseph D Castro, Choong Hun Lee. OptimumDesign for the Carbon Nanotube Based Micro-Focus X-Ray Tube [J]. Vacuum, 2015, 111: 142-149.
- [10] Park S, Kang J T, Jeong J W, *et al.* A Fully Closed Nano-Focus X-Ray Source with Carbon Nanotube Field Emitters [J]. IEEE Electron Device Letters, 2018, 39(12):1936-1939.
- [11] 张继君,李海,李俊,等. 碳纳米管场发射微焦点高速 X 射线管[J]. 真空电子技术,2015,(01): 8-11.
- [12] 杜小飞,张晓兵,狄云松,等. 碳纳米管冷阴极电子枪栅网电子通过率的仿真及实验[J]. 电子器件,2017,40(03):530-534.
- [13] 刘梦龙,李小兵,周俊涛,等. 基于碳纳米管场致发射的大功率脉冲 X 射线管[J]. 真空电子技术, 2019,(06):89-93.
- [14] 唐华平,陈志强,刘昂,等. 基于碳纳米管场致发射阴极的可变焦 X 射线管[J]. 核技术,2020, 43(03): 15-20.
- [15] 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(04):321-329.

收稿日期:2021-10-26

作者简介:



张扬(1998—),男,东南大学仪器科学与工程学院在读研究生,研究方向为真空电子技术及器件,E-mail: zhangy7597@163.com。