

# 辐射型加热磁控注入电子枪温度均匀性和热形变分析

杨明哲<sup>1,2</sup>, 王小霞<sup>1\*</sup>, 樊宇<sup>1</sup>, 孟鸣凤<sup>1</sup>, 杨晨<sup>1</sup>, 高察<sup>1</sup>, 罗积润<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院空天信息创新研究院 高功率微波源与技术重点实验室, 北京 100190;

2. 中国科学院大学 电子电气与通信工程学院, 北京 100180)

**摘要:** 基于 140 GHz 兆瓦级回旋振荡器电子枪设计和研制, 利用 ANSYS 热分析软件, 建立相应的磁控注入电子枪模型, 分析电子枪工作时阴极温度均匀性及热形变, 尝试通过相关几何和电参数的调整, 在改善阴极温度均匀性的基础上, 尽可能消除热形变对电子轨迹质量的影响。通过对比相同加热功率下阴极发射带的实测温度及仿真温度, 评价了仿真模型及结果的合理性, 为阴极组件的实际设计提供了参考数据。

**关键词:** 磁控注入电子枪; 电子枪阴极; 热分析; ANSYS; 热形变

中图分类号: TN129 文献标识码: A

## Temperature uniformity and thermal deformation analysis of the cathode with radiation heating in the magnetron injection electron gun

YANG Ming-Zhe<sup>1,2</sup>, WANG Xiao-Xia<sup>1\*</sup>, FAN Yu<sup>1</sup>, MENG Ming-Feng<sup>1</sup>, YANG Chen<sup>1</sup>,  
GAO Cha<sup>1</sup>, LUO Ji-Run<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of High Power Microwave Sources and Technologies, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, Beijing 100180, China)

**Abstract:** Based on the development of a magnetron injection electron gun (MIG) for gyrotron oscillator operating at 140 GHz and with about a megawatt output power, the temperature homogeneity of the cathode and thermal deformation of the MIG were analyzed with ANSYS code. Under an improved temperature homogeneity of the cathode, the geometrical and electrical parameters have been adjusted and optimized to eliminate the effect of thermal deformation on beam trajectory. The simulated temperature of the cathode will be compared with the tested one for evaluating the rationality of the simulation model, which may be helpful for the actual design.

**Key words:** magnetron injection electron gun, cathode, thermal analysis, ANSYS code, deformations

## 引言

回旋管作为一种工作在高频段且具有高功率、高效率特点的真空电子器件, 在雷达通信、电子对抗、高能加速器和等离子体加热等方面具有广泛的应用前景。在回旋管中, 磁控注入电子枪为其核心部件, 采用热阴极的工作方式, 内置的发热灯丝将

热量传递到阴极发射带上, 使电子获得足够的能量, 受激并逸出阴极表面, 产生电子注。由于磁控注入电子枪工作在温度限制区, 阴极的热分布会影响电子枪的发射性能和寿命, 成为制约回旋管可靠性的主要因素。为避免造成资金、人力物力和时间上的浪费, 对回旋管的热特性进行仿真模拟, 并验证其可靠性, 是实验样管研制工作的一个重要环

收稿日期: 2022-07-26, 修回日期: 2022-09-13

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFE0300202, 2017YFE0300200)

Foundation items: Supported by the National Key R&D Program of China (2017YFE0300202, 2017YFE0300200)

作者简介 (Biography): 杨明哲 (1999-), 男, 湖北荆州人, 硕士学位, 主要研究领域为微波毫米波器件。E-mail: 1256475986@qq.com

\*通讯作者 (Corresponding author): E-mail: xxwang@mail.ie.ac.cn

Received date: 2022-07-26, revised date: 2022-09-13

节<sup>[1-5]</sup>。对于磁控注入电子枪性能而言,阴极发射带的温度均匀性关乎产生的电子注质量,而当阴极工作在稳态温度时,将会不可避免的发生热形变,对电子注参数产生影响。因此,利用仿真软件对电子枪进行准确的热分析是设计电子枪和优化其结构的重要手段,也是回旋管能获得高功率、高稳定性和可靠性的重要保证<sup>[6-11]</sup>。

通常有两种方式实现电子枪阴极加热。其一是辐射加热,这一方式能够使阴极表面温度均匀性相对容易实现,但热效率很低,会导致电子枪整体温度高,对焊接和冷却提出了极为苛刻的要求;另一种方式是接触式加热,这种方式的加热效率相对高,但要实现好的均匀性对灯丝的绕制和装配方式有非常高的要求,很难达到像辐射加热那样的均匀性,两种方式各有特点。由于回旋管电子枪工作在温度限制状态,对温度的均匀性具有特别高度要求。本文主要从辐射加热型电子枪着手,讨论其受热后的温度均匀性及变形对电子轨迹的影响,同时给出相应的改善办法,为电子枪组件的设计及制备提供一定依据。

## 1 利用 ANSYS 建立电子枪热分析模型

### 1.1 热分析模型

本文基于 140 GHz 兆瓦级回旋振荡器采用的电子枪设计和研制,建立对应的磁控注入电子枪模型,主要包括前聚焦极、阴极体、灯丝、后聚焦极和支撑筒等结构如图 1 所示。灯丝在电子枪内呈螺旋分布,通过热辐射的形式将热量传递到阴极和前后聚焦极上。

电子枪设计的基本参数如表 1(a) 所示,阴极体结构如图 1(b) 所示, $R_a$  为阴极体表面中心半径, $W$  为阴极体表面轴向宽度。由于阴极本身发射能力的限制,一般阴极发射电流密度低于  $10 \text{ A/cm}^2$ 。为了达到较大的工作电流,则需要增大阴极半径或发射带宽度<sup>[12]</sup>。而增大阴极发射带宽度会使得发射带两端电子所处的电磁场环境差别较大,对电子注的速度零散影响较大,不利于电子注质量的提高。因此设计时需要阴极体半径及发射带宽度进行综合考量。最终优化得到阴极体半径为 49 mm,发

射带宽度为 5 mm。同时,阴极的倾角对电子注质量非常重要,在阴极发射带宽度确定后,阴极倾角越小时,发射带靠近前聚焦极和靠近后聚焦极两处发出的内外层电子注所受电磁场的力差距越大,则作用在外层电子上的磁场小回旋半径大;作用在内层电子上的磁场更大回旋半径小,将可能导致电子轨迹交叉,造成电子注速度零散变坏,引起非层流电子注。当倾角逐渐增大时,内外层电子磁场差别变小,电子注速度零散将减小,层流性变好<sup>[13]</sup>。层流电子注和非层流电子注之间并不存在明显的界限,一般认为,当倾角大于  $20^\circ$  时,可认为电子注的层流性良好,因此选择  $26^\circ$  为阴极倾角。

灯丝的排列方式包括螺距、绕制半径及距底部支撑结构的距离对阴极发射带温度的均匀性至关重要。灯丝绕制的倾角需与阴极倾角一致,使热量更加均匀的辐射至阴极体内表面上。灯丝缠绕的螺距变小会使其辐射的热量更加集中,有利于提高阴极温度和发射带均匀性,但同时要兼顾工程可行性的要求。灯丝的缠绕半径会影响其距阴极体内表面的辐射距离,灯丝距底部支撑结构距离太近则可能因高温状态灯丝发软过于靠近支撑面带来短路危险。实际需要选取灯丝最合适的各项参数,同时保证阴极发射带温度的均匀性和可靠性。

电子枪内热量主要以热传导和热辐射的形式耗散,灯丝附近的钨热屏能够阻止热量直接向圆环陶瓷辐射,以降低热量在其中的储存。圆环陶瓷与灯丝夹板瓷相结合定位灯丝避免短路发生。后聚焦极与支撑筒之间的钨热屏能够有效地阻止热量向下耗散。阴极支撑筒上的开槽起到阻碍热量向下传导的作用。支撑筒上共有 18 个槽,每层 3 个均布,共 6 层,相邻两层的槽错开  $60^\circ$  分布,在保证其拥有足够的结构强度下最大限度的减少了热量损耗,提高了阴极加热效率。

电子枪中阴极体及加热灯丝采用钨材料,前后聚焦极和支撑筒采用钼材料,钨热屏采用钨材料等。在 ANSYS 材料库中设置各材料的热导率、弹性模量、泊松比等参数如表 2 所示。本文的热分析将基于表 1 和 2 的结构和材料参数进行。

表 1 电子枪基本参数

Table 1 Parameters of the electron gun

阴极体表面中心半径/mm	阴极体轴向宽度/mm	阴极电流发射密度/ $\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}$	阴极角度/ $(^\circ)$	横纵速度比	引导中心半径/mm
49	5	2.6	26	1.32	10.3

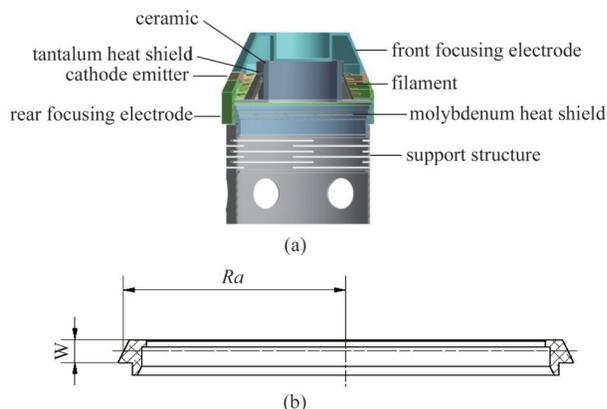


图1 电子枪及阴极体结构示意图 (a) 电子枪结构, (b) 阴极体结构

Fig. 1 The schematic view of electron gun and cathode emitter, (a) the structure of electron gun, (b) the structure of cathode emitter

表2 材料参数

Table 2 Material parameters

	热导率/ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$	热膨胀系数/ $(\mu m \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	泊松比	弹性模量/GPa
钨	159	6	0.3	351
钨	174	4.5	0.28	411
陶瓷	14.7	8.8	0.3	310
钽	54	6.5	0.35	186

## 1.2 边界条件和电子枪稳态温度分布

在ANSYS热分析软件中,热载荷是将加热功率转换为热功率体密度施加在加热灯丝上,单位体积的热生成率计算式如下

$$P = \frac{UI}{2\pi r_1 \sum \pi r_0^2}, \quad (1)$$

其中, $U$ 为输入电压, $I$ 为输入电流, $r_1$ 为加热灯丝到中心对称轴的距离, $r_0$ 是加热灯丝半径。由于电子枪内部是高真空密闭环境,不存在热对流情况,传热方式为热辐射,热辐射传热过程可用如下式子计算

$$Q = \sigma \xi A_i F_{ij} (T_i^4 - T_j^4), \quad (2)$$

式中, $Q$ 为物体之间传递的总热量, $\sigma$ 为物体的辐射率, $\xi$ 是一个常数, $A_i$ 表示物体 $i$ 的面积, $T_i$ 和 $T_j$ 是物体 $i$ 和物体 $j$ 的温度, $F_{ij}$ 表示物体 $i$ 和物体 $j$ 之间的形状系数,其决定了辐射体间的形状尺寸。利用ANSYS热分析软件,基于表1和2的参数,构建电子枪模型,并对不同材料的部件施加合适的辐射系数,进行网格划分时,网格质量的好坏会影响最终仿真结果,把网格大小逐渐缩小直至仿真温度结果变化

小于1%作为收敛条件以获取最终结果。对于发射带及附近部件进行精密网格划分,支撑筒及绝缘陶瓷结构可适当增大网格大小,以适当减少计算量。设定环境温度为 $20^\circ C$ ,加热功率从600 W逐渐变化到1 000 W,阴极发射带表面最高温度变化如图2所示。随加热功率的增加,阴极发射带的表面温度也增大。当加热功率为925 W时,阴极发射带表面达到 $994.5 \sim 996.9^\circ C$ ,图3给出了当设计的灯丝螺距为7.5 mm,最靠近底部灯丝的缠绕半径为43 mm,距底部支撑结构2.4 mm时,电子枪模型(a)、阴极体(b)及发射带温度分布(c),从图3(b)和图3(c)可看到此时阴极体温差为 $4.1^\circ C$ ,阴极发射带表面温差为 $2.4^\circ C$ ,选择此加热功率并进行进一步优化。

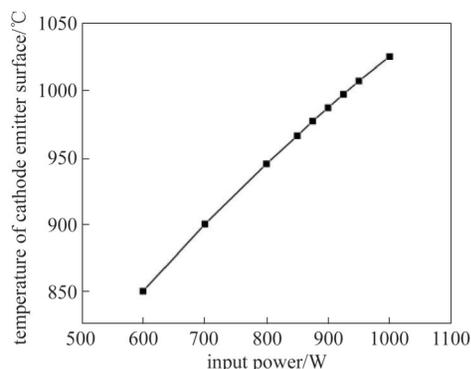


图2 发射带最高温度随加热功率变化图

Fig. 2 The maximum temperature of the emitter changing with heating power

## 2 阴极温度均匀性分析

阴极温度均匀关系着发出的电子注的质量和稳定性。磁控注入电子枪热分析的主要目的是寻求一种合理的灯丝绕制和排列方式,结合有效的热隔离和屏蔽,通过合理调节几何结构和电参数,使得由灯丝产生的热量尽可能地均匀地分布在阴极体内和发射表面。

图4为电子枪加热灯丝的结构图,主要调节参数包括定位陶瓷,灯丝的螺距、缠绕半径及灯丝与阴极的相对位置等。图5(a)展示了随着灯丝绕制螺距的减小,灯丝产生的热量更加集中,因此阴极表面的温差也在逐渐减小。考虑到工程制备的问题,螺距不能持续减小。在螺距为6.5 mm时得到阴极表面最小温差 $1.5^\circ C$ 。图5(b)展示了灯丝缠绕半径对发射带表面温差的影响,当缠绕半径增加时,发射带表面温差先增大后减小再增大,在距底部2.4 mm的灯丝缠绕半径为44 mm时,阴极表面的最

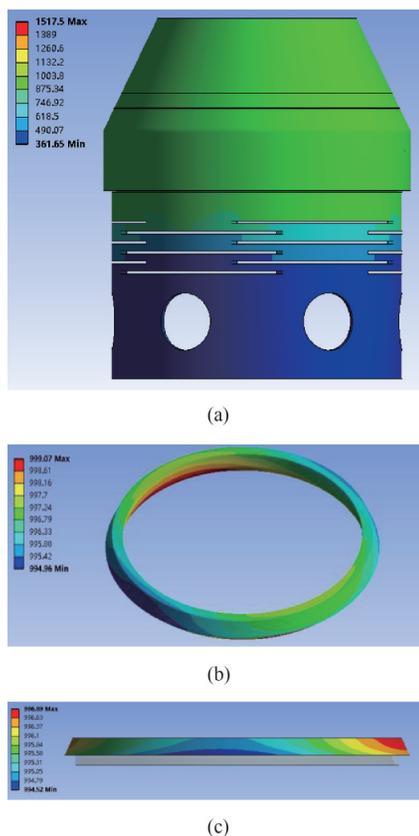


图3 电子枪、阴极体及阴极发射带温度分布图,(a) 电子枪温度,(b) 阴极体温度,(c) 发射带温度

Fig. 3 Temperature distribution of electron gun, cathode body and cathode emitter, (a) temperature distribution of electron gun, (b) temperature distribution of cathode body, (c) temperature distribution of cathode emitter

小温差为 1.4 °C。图 5(c) 为灯丝距支撑结构的距离对阴极表面温差的影响, 从图中可看出灯丝越接近底部支撑结构, 阴极表面温差越小。

当加热功率为 925 W, 加热灯丝螺距为 6.5 mm, 最靠近底部灯丝的缠绕半径为 44 mm, 距底部支撑结构 1.4 mm 时, 阴极体温差 3.2 °C, 阴极发射带表

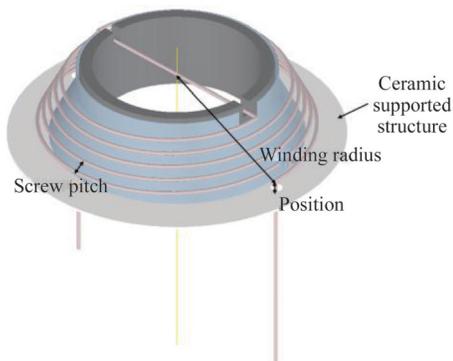


图4 加热灯丝结构图  
Fig. 4 Heater structure

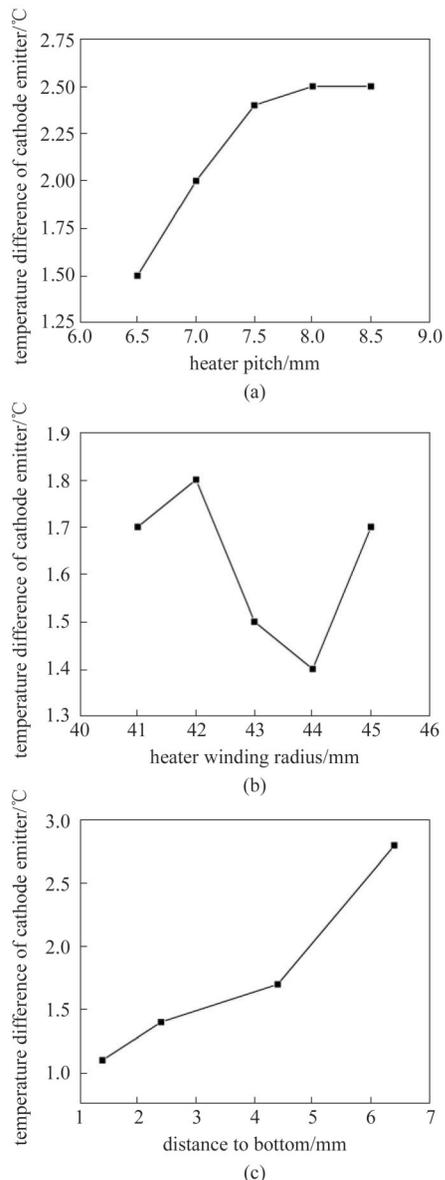


图5 阴极发射带表面温差随灯丝参数变化图,(a) 灯丝螺距,(b) 灯丝绕制半径,(c) 灯丝距底部支撑结构距离

Fig. 5 Temperature difference on the cathode emitter surface with different heater parameters, (a) heater pitch, (b) heater winding radius, (c) heater position

面温度在 1 002. 5~1 003. 6 °C, 温差为 1. 1 °C。但由于工程上考虑, 灯丝与陶瓷支撑结构过于接近可能导致受热后的灯丝与其接触短路, 因此需要预留出足够的安全距离和确保实际工程制备和安装的可行性。表 3 展示了选取不同灯丝距底部支撑结构的距离对阴极表面温差的影响。从表征可以看出, 随着距离的增加, 温差的变化并不是太快, 实际应用可以针对结构设计的可行性和绝缘考虑相结合决定。

表3 灯丝距底部陶瓷支撑结构距离对阴极表面温差的影响

Table 3 Temperature difference of cathode emitter varying with heater position

灯丝距底部陶瓷支撑结构距离/mm	阴极表面温差/°C	阴极体温差/°C
1.4	1.1	3.2
2.4	1.4	3.5
4.4	1.7	3.5
6.4	2.8	4.4

### 3 电子枪阴极模型热形变分析及实测数据

当磁控注入电子枪阴极发射带被加热到1 000 °C时,电子枪发生热形变不可避免。因此,分析其发生的热形变对研究电子枪性能及产生的电子注质量有重要意义。在ANSYS软件中建立结构静力分析模块,将上述得到的电子枪稳态温度作为载荷,设置环境温度为20 °C,因实际装配中电子枪底部有固定支撑结构,所以对电子枪底部施加固定约束分析电子枪产生的热形变。计算得到的电子枪及发射带轴向上的热形变分布如图6所示,设电子枪底部形变量为0,电子枪轴向上相较于其底部最大形变为0.57 mm(聚焦极顶部),阴极发射带上端轴向上相较于电子枪底部最大形变为0.36 mm。电子枪及发射带径向上的热形变分布如图7所示,电子枪径向上的最大形变在后聚焦极上,其相较于电子枪中心轴最大形变量为0.3 mm,发射带径向上相较于电子枪中心轴的最大形变为0.26 mm。电子枪的热形变主要集中在灯丝及其附近部件,支撑筒因远离

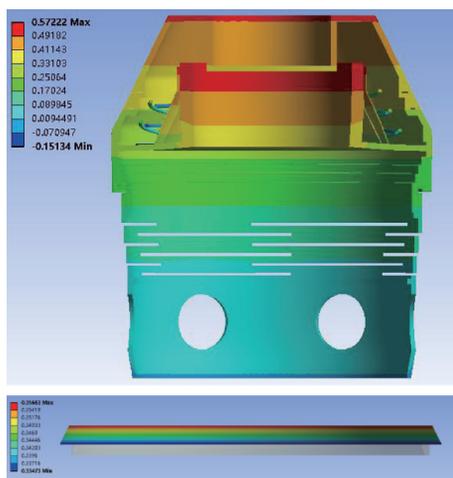


图6 电子枪及阴极发射带轴向上热形变分布图

Fig. 6 Thermal deformation distribution of electron gun and cathode emitter in the axial direction

灯丝其热形变量较小。

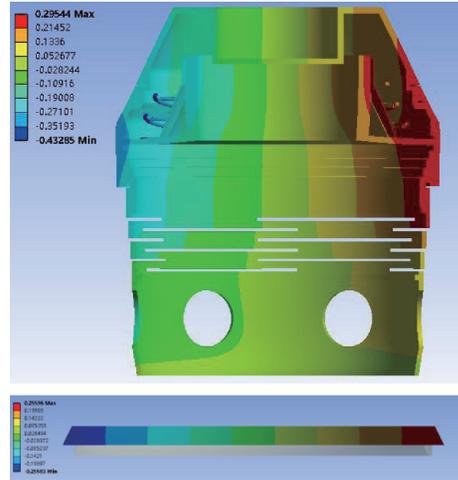


图7 电子枪及阴极发射带径向上热形变分布图

Fig. 7 Thermal deformation distribution of electron gun and cathode emitter in the radial direction

上述是单独对电子枪进行热形变分析的结果。在实际回旋管中,电子枪是与第一阳极通过外壳及托底部件连接在一起。图8为电子枪及第一阳极结合模型在灯丝加热功率为1 100 W时的热稳态分布图,其中电子枪发射带表面温度为913 °C,第一阳极温度为200 °C。在此稳态温度下,设置底部托底结构形变量为0,第一阳极外径相较于中心轴向外最大形变增量为0.23 mm,内径向外最大形变增量为0.19 mm,与阴极相对应的圆锥相对位置伸长0.37 mm,轴向上相较于底部最大形变为0.5 mm。电子枪径向相较于中心轴最大形变为0.29 mm,阴极发射面斜边径向增大0.24 mm并且轴向相对位置伸长0.57 mm,轴向最大伸长为0.72 mm。

电子枪的热形变膨胀会使其和第一阳极之间的径向距离减小,导致电子注质量变差,达不到预期的设计结果,图9展示了电子注包络、第一阳极和电子枪相对位置,其中 $d$ 为电子注到第一阳极最小距离。通过将CST中仿真得到的电子注轨迹参数及第一阳极和电子枪位置参数导入Matlab软件中,数值计算得到形变前电子注包络外边沿距第一阳极最小距离为2.1 mm,形变后这一最小距离变为了1.8 mm。电子枪形变后电子注离第一阳极更加接近,电子打在第一阳极上的概率增大,因此加工时需要留足够的加工余量来减小热形变带来的影响。利用仿真获得的热形变结果修改电子枪模型结构参数,将修改后的模型导入CST软件中,计算得到电

子注参数变化如表4所示,电子注引导中心半径增加了0.08 mm,横纵速度比增大了0.16,横向速度零散增大了0.6%。

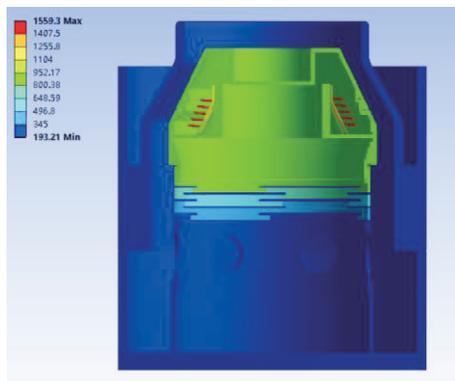


图8 电子枪及第一阳极结合模型和温度分布图

Fig. 8 Temperature distribution of electron gun and first anode

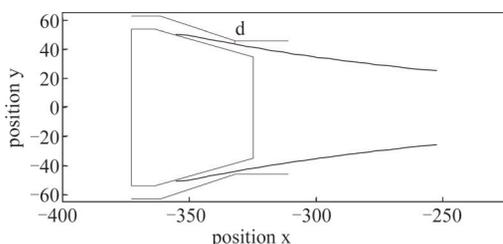


图9 二维电子注轨迹图

Fig. 9 The 2D trajectory of electron beam

表4 电子枪形变前后电子注参数的变化

Table 4 Variation of electron beam parameters before and after electron gun deformation

	引导中心半径/mm	横纵速度比	横向速度零散
形变前	10.34	1.3	4.2%
形变后	10.42	1.46	4.8%

按上述热形变量将第一阳极半径缩小0.19 mm,轴向缩短0.5 mm,电子枪半径缩小0.24 mm,轴向缩短0.72 mm后,灯丝施加1 100 W加热功率,得到第一阳极内径最大形变为0.19 mm,轴向最大形变为0.51 mm,电子枪发射斜面径向最大形变为0.24 mm,轴向最大形变为0.72 mm,第一阳极和电子枪的热形变幅度几乎和留有的加工余量完全一致。也就是说,形变后的尺寸几乎完全与初始设计的尺寸一致。因此根据热形变的数值来推断所应保留的加工余量能够有效的缓解热形变带来的影响,可以使电子枪在高温工作时其结构参数仍满足设计要求。

为了验证 ANSYS 热分析软件仿真结果的准确性,对阴极发射带表面温度进行温度测试实验,在真空的环境下给定灯丝的输入电压及输入电流,得到不同加热功率下的电子枪阴极发射带的温度。在 ANSYS 中对电子枪模型输入相同的加热功率,得到仿真的阴极发射带温度进行比较如表5所示。

表5 实测与仿真数据

Table 5 Measured and simulated data

输入电压/V	输入电流/A	实测温度/°C	仿真温度/°C
20.5	31	851	871
21.7	32	882	900
23.4	33.7	943	924
24.9	35	980	978

从表5中可看出,当实测温度在850~1 000 °C时,仿真温度与实测温度的误差小于2%,当阴极发射面温度为990 °C时,前聚焦极实测温度914 °C,仿真温度901 °C,后聚焦极实测温度905 °C,仿真温度901 °C,相对误差小于2%。实测得到的电子枪阴极沿轴向增长0.78 mm,而仿真得到阴极轴向增长为0.72 mm,相对误差为8%左右。确保了仿真数据的合理性,可以为电子枪的实际设计和制备提供有效的依据。

## 4 结论

基于140 GHz兆瓦级回旋振荡器电子枪设计和制备,利用 ANSYS 热分析软件,建立了电子枪组件热分析模型,对辐射加热磁控注入电子枪进行了稳态温度分布及热形变分析。通过合理调整加热灯丝的几何和热参数以及其与阴极之间的相对位置,致力于改善阴极体和发射表面温度均匀性。在温度均匀性相对改善的条件下,分析了热形变对电子轨迹质量的影响,并找到了弥补形变影响合适的方法。结果表明,通过合理选择结构参数来平衡电子枪产生的热形变,可以使得在工作温度下电子轨迹与设计相符并同时能够改善加热均匀性。同时相关阴极工作温度的仿真结果与实验有很好的 consistency。

## References

- [1] Ives R L, Borchard P, Collins G, et al, Improved magnetron injection guns for gyrotrons[J], *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2008, **36**(3):620-630.
- [2] NIU Jing-Yang. Thermal analysis of Electron Gun for Gyro-Traveling Wave Tubes [D]. University of Electronic Sci-

- ence and Technology(牛婧杨。回旋行波管电子枪热分析研究。成都:电子科技大学), 2013:1-2.
- [3] JIANG Wei, LUO Yang. Thermal analysis of electron gun for Ka band gyro-traveling wave tubes[J]. *Journal of microwave* (蒋伟, 罗勇。Ka波段回旋行波管电子枪阴极热分析。微波学报), 2012, **28**(04):81-84.
- [4] XU Shou-Xi, HOU Xiao-Wan, WANG Zhan-Dong, *et al.* Thermal analysis of electron gun for W-band gyro-traveling-wave amplifier[J]. *J.Infrared Millim.Waves*(徐寿喜, 侯筱琬, 王占东, 等。W波段回旋行波管电子枪热分析。红外与毫米波学报), 2018, **37**(3):275-277.
- [5] XU Sheng, HU Quan, HUANG Tao, *et al.* Thermal and deformation analysis of electron gun for traveling wave tubes [J]. *Vacuum Electronics* (徐升, 胡权, 黄桃, 等。行波管电子枪组件的热及形变分析。真空电子技术), 2011, **02**:9-12.
- [6] Tang C, Wang H, Niu X, *et al.* Thermal analysis of magnetron injection gun for 170GHz gyrotron [C]. In: 2019 12th UK-Europe-China Workshop on Millimeter Waves and Terahertz Technologies (UCMMT), 2019: 1-3.
- [7] YAO Lie-Ming, XIAO Li, YANG Zhong-Hai. Thermal stress analysis of the electron gun [J]. *High Power Laser and Particle Beams* (姚列明, 肖礼, 杨中海。行波管电子枪阴极组件的热计算。强激光与粒子束), 2004, **16**(10):1317-1319.
- [8] Liu Y, Liu J, Tang C, *et al.* Thermal analysis of magnetron injection gun for 170 GHz gyrotron[J]. *Microw Opt Technol Lett.* 2020; **62**:2774-2781.
- [9] Siva Rao P V, Srikrishna P, Sharma N K, *et al.* Thermal analysis of Magnetron Injection Gun[C]. In: 2009 IEEE International Vacuum Electronics Conference, 2009: 491-492.
- [10] Gu Ling, Niu Xinjian, Li Ruli, *et al.* Thermal analysis of electron gun assembly for gyrotron[J]. *Vacuum Electronics* (顾玲, 牛新建, 李儒礼, 等。回旋振荡管电子枪组件热分析。), 2015, **02**:31-34+45.
- [11] W. Jiang, J. Wang, Y. Luo, *et al.* Thermal analysis of sheet beam gun for the sheet beam traveling wave tube[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2016, **63**: 1312-1316.
- [12] Chen Xu-Lin, Zhao Qing, Liu Jian-Wei, *et al.* Analysis and design of a double-anode magnetron injection gun for 1THz gyrotron[J]. *Acta Phys. Sin.* (陈旭霖, 赵青, 刘建卫, 等。1THz回旋管双阳极磁控注入电子枪的分析及设计。物理学报), 2012, **61**(7): 074104-1-074104-3.
- [13] ZHU He. Study on the electron gun and collector pole of 140GHz gyrooscillation tube [D]. University of Chinese Academy of Sciences(朱贺。140GHz回旋振荡管电子枪和收集极的研究中国科学院大学), 2019:32-33.