## Thermal Analysis and Structural Optimization Design of Grid Components of 500 kW Tetrode<sup>\*</sup>

ZHAO Yaqi<sup>1,2\*</sup>, ZHANG Rui<sup>1\*</sup>, WANG Yong<sup>1,2</sup>, YANG Xiudong<sup>1</sup>

 (1.Key Laboratory of Science and Technology on High Power Microwave Sources and Technologies, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
 2.School of Electronic, Electrical and Communication Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The quadrupole electron tube can be used as the radio frequency power source of the radio frequency quadrupole (RFQ) accelerator. The cathode and the grid are the key electrodes of the tetrode, and the structure parameters of them will directly affect the output power, gain and other main performance parameters of the tetrode. The finite element analysis software ANSYS is used to perform thermal analysis on key components such as the grid of a tetrode with an RF frequency of 195 MHz~600 MHz and an output power of 500 kW. In order to simulate the normal working condition, the given power of the cathode assembly is applied. The temperature distribution of the cathode and the grid assembly is observed. Then, the structure optimization and design of the heat sink fins of the suppression grid are carried out. The height and thickness of the fins are redesigned to observe the temperature distribution of the grid. The experimental results show that the maximum temperature of the grid decreased from 289.29 °C to 268.21 °C, which optimized the heat dissipation effect of the suppression grid. The thermal-structural module of ANSYS was used for coupling analysis to verify the rationality of the optimized grid structure. It solves the heat dissipation requirement of the tetrode and ensures that the tetrode can operate normally at a suitable temperature.

Key words: tetrode; RF power source; control grid; thermal analysis; structure optimization

EEACC:2330 doi:10.3969/j.issn.1005-9490.2022.02.006

# 500 kW 四极电子管栅极组件热分析与结构优化\*

赵亚琦<sup>1,2</sup>,张 瑞<sup>1\*</sup>,王 勇<sup>1,2</sup>,杨修东<sup>1</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 100049)

**摘 要:**四极电子管可以作为射频四级场(radio frequency quadrupole, RFQ)加速器的射频功率源,而阴极和栅极作为四极电子管的关键电极,其结构参数直接影响四极电子管的输出功率和增益等主要性能参数。利用有限元分析软件 ANSYS,对 RF 频率为 195 MHz~600 MHz、输出功率为 500 kW 的四极电子管的栅极等关键部件进行了热分析计算。为模拟工作状态,首先施加阴极 组件给定的功率,观测阴极和栅极组件的温度分布情况,然后进行抑制栅极散热翼片的结构优化与设计,仿真结果显示:栅极最 高温度从 289.29 ℃下降至 268.21 ℃,达到优化抑制栅极的散热效果,并使用 ANSYS 的热-结构联合模块对其进行耦合计算分 析,验证了优化后栅极结构的可行性,改善了四极管的散热需求,从而保证四极管能在合适的工作温度下稳定运行。

关键词:四级电子管;射频功率源;控制栅极;热分析;结构优化

## 中图分类号:TN965 文献标识码:A 文章编号:1005-9490(2022)02-0277-05

射频四级场加速器是一种新型强流低能离子直 线加速结构,它是 20 世纪 80 年代后在国际上迅速 发展起来的一种新型直线加速器<sup>[1]</sup>。RFQ 加速器 能够产生高强度的中子流,直接加速低能粒子,既可 以在重离子加速上使用,又可以在强流轻离子的加 速上使用,具有束流强、传输效率高等优点,得益于 RFQ 的优点,加速器的技术受到越来越多的关 注<sup>[2]</sup>。在国际上,RFQ 加速器被应用于基本粒子物 理、强中子源、加速器驱动系统、医学治疗、材料研 究、离子束应用等领域;在国内,RFQ 加速器则被应

**项目来源:**国家磁约束核聚变能发展研究专项项目(2018YFE0305100);中国科学院科研仪器设备研制项目(YJKYYQ20180005) **收稿日期:**2021-03-23 修改日期:2021-05-27 用于国内的散裂中子源项目等大科学装置<sup>[3]</sup>。中 国散裂中子源采用质子直线加速器与快循环同步加 速器方案。强流质子直线加速器由频率 324 MHz, 脉冲功率 2.5 MW、脉冲宽度 600 μs 的长脉冲速调 管驱动<sup>[4]</sup>,中国散裂中子源的结构如图 1 所示。



图1 中国散裂中子源结构示意图

加速器射频功率源共有三种选择:速调管、固态 射频放大器和四极电子管(以下简称:四极管)。目 前,散裂中子源加速器主要以 P 波段大功率速调管作 为射频功率源,尽管速调管符合散裂中子源各种类型 加速器的性能要求,也能够长期可靠运行,但是工作 电压比较高,如峰值功率 5 MW 的 P 波段速调管 TH2168,电子注电压为140 kV,体积和重量相对都比 较大、高频系统的制造成本也偏高[5-6]。而固态射频 放大器的输出功率有限,无法完全替代速调管,因此 中国散裂中子源加速器急需要体积小、重量轻、工作 电压低的、能够替代速调管的微波器件。相对于速调 管和固态射频放大器,四极管具有成本低、结构紧凑、 电稳定性好、高效率等优点,在系统性能和质量可靠 性上能完全替代速调管,这也是国内首次将四极管用 于散裂中子源结构中,在很大程度上有助于解决当前 我国加速器射频功率源单一选择的难题,是具有重大 发展潜力和应用前景优越的功率源[7]。

## 1 四极管热分析研究

#### 1.1 三维结构模型的建立

从内至外,四极管结构由阴极、控制栅极、抑制 栅极和阳极组成,各组件分布在不同的同心圆轨道 上。其中阴极采用直列笼型结构,在弹簧的牵引下, 悬挂在控制栅极的中心区域;控制栅极固定在底座 上,是由铜基座和平行排列的栅丝网组成,可以控制 阴极电流的大小;抑制栅极在控制栅极的外围,由两 个侧面翼片、铜基座和平行排列的栅丝网组成,能够 抑制二次电子的转移,可以起到改善电流分配的效 果。栅极作为四极管的核心部件,采用双栅的结构 设计,起到改善阴极性能、减小栅极功率耗散和提高 四极管输出性能的作用。与传统的速调管对比,采 用栅丝网对阴极电流进行调制,就拥有较小的截止 电压,可以减少响应时间<sup>[8]</sup>。相比于其他电极组 件,栅极组件的栅丝网就比较脆弱,单个栅丝的直径 为0.8 mm,总长为2 mm,因此需要得到足够的重 视,以确保栅极的性能可以正常发挥。



#### 图 2 四极管的三维立体模型

鉴于四极管内部结构基于对称型的设计理念, 并考虑到四极管内部组件较为精密,所以将四极管 内部复杂的结构进行简化处理,将整体组件均匀划 分为40个单元,仅选取一个单元作为简化模型进行 仿真实验,为防止划分网格出现计算精度下降的问 题,选取10节点四面体的 SOLID87 单元作为仿真 单元<sup>[9]</sup>,四极管简化后的三维立体模型如图2所示。

## 1.2 热载荷和参数的设置

传热方式主要包括热传导、热对流和热辐射三 种方式。鉴于四极管内部属于真空环境,热对流的 传热方式可以忽略不计,只需要考虑两种传热方式, 即热辐射和热传导。选择有限元软件 ANSYS 的稳 态热分析(Steady-State Thermal)模块进行仿真实 验。在结构模型中,阴极为热源,表面覆盖的材料为 镍。控制网和抑制网均由两种金属材料组成,其中 栅丝材料为钨,其余部分为铜,材料属性的具体参数 见表 1。根据表中的材料数据,对结构的材料特性 参数进行了设置。假设外部环境温度为 20 ℃,以热 流 heat flow 的形式在阴极上施加 6 W 的能量<sup>[10]</sup>。

#### 表1 主要材料特性参数

| 材料参数           | 铜                     | 钨                     | 镍                     |
|----------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 比热容/(J/(kg•℃)) | 390                   | 132                   | 440                   |
| 导热系数/(W/(m・K)) | 400                   | 174                   | 90.0                  |
| 泊松比            | 0.324                 | 0.280                 | 0.291                 |
| 膨胀系数/℃-1       | $1.89 \times 10^{-5}$ | $4.60 \times 10^{-6}$ | $1.68 \times 10^{-5}$ |

第2期

#### 1.3 热载荷和参数的设置

在完成参数设置等操作后,进行热分析仿真实 验,得到结构的温度分布如图 3 所示。从图中可以 得出,阴极温度是各组件中最高的,最高处的温度为 706.9 ℃,温度从阴极中心向四周逐渐下降,最外层 的抑制栅极的温度最低,最低为 286.51 ℃。温度的 分布与电子轨迹模型图相吻合:电子从作为热源的 阴极发射出去,穿过双栅结构,最后被阳极收集,电 子的运动轨迹代表了热量传播的途径<sup>[11]</sup>。



## 2 抑制栅极结构设计与优化分析

#### 2.1 抑制栅极优化分析

参考各微波器件的散热形式与散热效果<sup>[12-14]</sup>, 在不改动阴极发射效果的情况下,选择从栅极出发, 通过分析抑制栅极的特性和结构分析,发现可以从 优化结构参数,改善散热结构,提高抑制栅极的散热



能力<sup>[15]</sup>。抑制栅极由两侧的翼片与无氧铜基座连接,栅极热量经过翼片以热传导的形式传至基座上, 而基座的热量则由基座内的冷却通道,通过水循环 将热量带到外界。在现有加工工艺的基础上,通过 改变抑制栅极散热翼片的开合角度来改善栅极的散 热效果,以及改变散热翼片与栅极的接触面积大小, 即散热翼片的高度和厚度,来改善栅极的散热效果。

#### 2.2 抑制栅极优化分析

在保持四极管各组件其他条件不变的前提下, 通过改变散热翼片的开合角度,实现散热效果的优 化。分别从不开合(即开合角度为0°)开始进行,每 次按照增加1°的尺度来增加,到最大开合限度的 4.5°,仿真结果如图4和图5所示。通过图中可知, 在翼片初始状态时,抑制栅极的最高温度289.29℃; 在开合角度从零逐渐变大时,抑制栅极的最高温度 也逐渐下降。

除了改变翼片的开合角度,还可以改变散热翼 片与铜基座接触面积的大小。在不改变其他结构尺 度的前提下,通过改变翼片的高度和宽度来改善散 热效果。栅极高度从初始的 34 mm 开始进行实验, 翼片向上延长,将高度增加 3.53 mm,至长度极限值 37.53 mm,即与栅极的帘板上端面平齐,其仿真实验 结果如图 6 所示。从图中可知,从初始状态时的栅 极高度增加到最大限度时,栅极的最高温度也逐渐 降低,抑制栅极的最高温度从 289.29 ℃降低到 284.69 ℃。



图 4 两个不同开合角度的抑制栅散热翼片温度分布





图 5 抑制栅极散热翼片不同开合角度的温度分布

图 6 抑制栅极散热翼片不同长度的温度分布

栅极的宽度从初始的 0 mm 增加到 0.2 mm 时,其 仿真实验结果如图 7 所示。从图中可知,从初始状态 开始,伴随着栅极长度增加,其最高温度稍有增加。鉴 于在没有外部循环水冷却的条件下,随着翼片的宽度



(b) 抑制栅极翼片厚度增加0.2 mm温度分布的俯视图 图 7 抑制栅极散热翼片不同厚度的温度分布 增加,致使热量聚集而不利于散热,但在外部水循环的 散热作用下,随着翼片宽带越宽,翼片与栅极基座的接 触面积越大,带走的热量也就越多,散热效果越明显。

为了进一步验证,将以上的优化措施进行整合。 在不改变其他组件的前提下,翼片角度增加4.5°的 同时,又增加翼片高度,进行稳态热分析计算,仿真 结果如图8所示。由图可知,随着抑制栅极的散热 翼片开合角度增大、栅极的高度增加,会明显提高抑 制栅极的散热能力,从而达到预期的优化效果。



图 8 优化设计后抑制栅极的温度分布

通过热-结构耦合仿真实验,来验证抑制栅极 的结构优化措施的可行性。将稳态热分析模块与力 学结构分析模块结合,设置力学约束条件:通过弹性 力来约束阴极,由弹簧约束(Weak Springs)固定阴 极的上下两个端面;由于控制栅极与托盘底座相连 接,只需要选择固定约束(Fixed-Support)来约束控 制栅极;抑制栅极通过翼片与无氧铜基座相连,需要 通过固定约束来约束翼片的两个侧面,以及栅极帘 板的下端部分区域。经过上述条件的约束,可以得 到热形变分布如图9所示。可知,抑制栅极最大形



变量为在 0.108 mm,发生在 x 方向上和 y 方向上的 热形变量是在结构尺度变化的允许范围内<sup>[16]</sup>。

## 3 结论

本文通过有限元软件 ANSYS,对 500 kW 四极 管进行了热分析仿真实验。根据抑制栅极的特性分 析,对栅极组件进行了结构优化。通过散热翼片的 优化设计,包括增大翼片的开合角度以及增加翼片 与无氧铜基座的接触面积,改善了散热效果。结果 表明,抑制栅极的最高温度从 289.29 ℃下降到了 268.21 ℃。而且,热-结构耦合分析,验证了栅极结 构设计方案的可行性。通过对抑制栅极的设计优化 以及热分析,可以为四极管的结构优化和热设计提 供理论和技术支撑。

#### 参考文献:

- [1] 肖永川,欧阳华甫,薛康佳,等.中国散裂中子源 RFQ 的研制 [J].核技术,2015,38(12):5-11.
- [2] 程贺,张玮,王芳卫,等. 中国散裂中子源的多学科应用[J]. 物 理,2019,48(11):701-707.
- [3] 王一农,徐晓荣,戴大富.中国散裂中子源负氢离子源射频功 率源的研制[J]. 舰船电子工程,2019,39(2):68-72,105.
- [4] 王静. 粒子加速器中 RFQ 加速结构的多物理场耦合研究[D]. 兰州:兰州理工大学,2016.



赵亚琦(1993—),男,汉族,河南濮阳 人,现为中国科学院大学硕士研究生, 主要从事新型大功率微波器件的研究 工作,18340828767@163.com。



**王 勇**(1964—),男,汉族,北京人,中 国科学院空天信息创新研究院研究 员,主要研究方向为微波毫米波器件 与技术,wangyong3845@ sina.com;

- [5] 傅世年,关遐令. 高流强 RFQ 质子加速器研制[J]. 原子能科
  学技术,2009,43(z1):159-164.
- [6] 丁耀根.大功率速调管的技术现状和最新进展[J]. 真空电子 技术,2020(1):1-25.
- [7] 丁耀根,张志强. 散裂中子源的高频系统和高功率微波器件[J]. 真空电子技术,2017(6):12-15,49.
- [8] 郑志清,罗勇,蒋伟,等.回旋行波管收集极的热分析[J].强激 光与粒子束,2013,25(3):721-726.
- [9] 孟鸣凤,俞世吉,徐振英,等. 行波管阴极热子组件结构的热分析[J]. 真空科学与技术学报,2009,29(5):513-516.
- [10] 牛婧杨,王丽,罗勇,等.回旋行波管电子枪阴极热分析[J].强 激光与粒子束,2013,25(2):446-450.
- [11] Zhao Yaqi, Zhang Rui, Wang Yong, et al. Study on Electron Trajectory of Cathode of 500 kW Tetrode and Thermal Analysis Verification [C]//2020 IEEE 6th International Conference on Computer and Communication, Chengdu, China, 2020;2161–2165.
- [12] 李延威,李建清. 空间行波管收集极的热特性分析[J]. 强激光 与粒子束,2009,21(3):399-402.
- [13] 刘磊,阮久福,杨军,等. 行波管电子枪热分析与结构优化设计[J].强激光与粒子束,2011,23(12):3421-3425.
- [14] Xu S X, Hou X W, Wang Z D, et al. Thermal Analysis of Electron Gun for W-Band Gyro-Traveling-Wave Amplifier [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2018, 37(3):275-277, 283.
- [15] 李建兵,郭盼盼,王永康,等. 小型化行波管放大器热仿真分析 及优化设计[J]. 强激光与粒子束,2019,31(11):49-54.
- [16] 卢姀. 电子枪设计的关键技术研究[D]. 成都:电子科技大 学,2015.



**张** 瑞(1979—),男,汉族,北京人,中 国科学院空天信息创新研究院研究 员,主要研究方向为高功率微波源与 技术,ruizhang@mail.ie.ac.cn;



**杨修东**(1984—),男,汉族,北京人,中 国科学院空天信息创新研究院助理研 究员,主要研究方向为高功率微波源 与技术,iecas\_xdy@ hotmail.com。