

## 行波管阴极和热子组件的热特性的数值模拟和实验研究

李鑫伟<sup>\*①②</sup> 俞世吉<sup>②</sup> 苏小保<sup>②</sup> 方有维<sup>②</sup> 孟鸣凤<sup>②</sup> 邢艳荣<sup>②</sup> 刘柳平<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(中国科学院电子学研究所 北京 100190)

<sup>②</sup>(中国科学院大学 北京 100049)

**摘要:** 阴极热子组件作为星载行波管的核心部件, 要求它具备稳定可靠、寿命长久、低功耗的特点。该文利用数值模拟和热测实验对某星载行波管阴极热子组件结构开展了研究, 提出一种接触热阻估算方法, 模拟了阴极热子组件结构热特性, 设计并完成了阴极热子组件结构热测实验, 首次获取了结构在一系列热子加热功率下由内到外的温度实测数据。进一步, 通过修正阴极热子组件结构热模拟边界及激励, 迭代得到接触热阻值, 获取了一种高可靠的阴极热子组件结构热模型, 实验表明, 该热模型阴极温度计算精度在5%以内, 结构最大温度计算误差不超过72°C。

**关键词:** 阴极热子组件; 热模型; 热测实验; 接触热阻

中图分类号: O462.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2016)11-2965-07

DOI: 10.11999/JEIT160035

## Thermal Simulation and Experiment on Cathode-heater Assembly of Space TWT

LI Xinwei<sup>①②</sup> YU Shiji<sup>②</sup> SU Xiaobao<sup>②</sup> FANG Youwei<sup>②</sup>  
MENG Mingfeng<sup>②</sup> XING Yanrong<sup>②</sup> LIU Liuping<sup>②</sup>

<sup>①</sup>(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

<sup>②</sup>(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** As the core component of space traveling wave tubes, the cathode-heater assembly is required to be stable, reliable, long life and low power consumption. In this paper, an estimation method of thermal contact resistance is proposed, and the thermal characteristics of cathode-heater assembly structure are simulated. Meanwhile, thermal experiment is designed and undertaken, and the whole temperature distribution of cathode-heater assembly structure under a variety of heating power is obtained for the first time. Furthermore, the thermal boundary and excitation of cathode-heater assembly structure is modified, and the values of thermal contact resistances are obtained by interactive method. Finally, a high reliable thermal model of cathode-heater assembly structure is obtained. It is revealed that cathode temperature calculating accuracy is within 5%, and the calculating error of whole structure is less than 72°C.

**Key words:** Cathode-heater assembly; Thermal model; Thermal experiment; Thermal contact resistance

### 1 引言

电子枪作为行波管<sup>[1-3]</sup>的电子注源, 它的性能直接影响到整管的稳定性能和寿命, 尤其对于星载行波管, 它要求电子枪稳定可靠、寿命长久、功耗低。在满足阴极稳定工作前提下, 降低热子的加热功率可降低电子枪功耗, 提高热子开关次数, 延长电子枪寿命。当前, 对电子枪热学性能的研究方法主要分为理论分析、计算模拟和实验<sup>[4-17]</sup>。通过理

论分析可深入了解电子枪热机理, 指导结构设计, 然而很难准确描述电子枪结构的温度场分布; 通过实验的方法可准确判断电子枪结构设计是否满足要求, 然而实验研究会消耗较大的财力和物力, 且研发周期长; 计算模拟是连接理论分析与实验的桥梁, 通过正确的计算模拟, 可清晰掌握电子枪结构的温度场分布, 明确结构设计的可行性, 极大缩短结构研发设计的周期。

目前, 针对电子枪结构的计算模拟发展迅速, 有些模拟计算较好地等效和考虑了热物理场的边界条件, 与阴极实测温度具有较好的一致性。然而, 当前电子枪的温度实测数据点主要集中在阴极、阳极、枪壳等部件上, 对它的核心部件-阴极热子组件

收稿日期: 2016-01-13; 改回日期: 2016-06-15; 网络出版: 2016-09-01

\*通信作者: 李鑫伟 xwli\_1989@163.com

基金项目: 国家863计划项目(2013AA8035040C)

Foundation Item: The National 863 Program of China (2013AA8035040C)

结构缺乏系统的温度测量，这就使模拟计算的实测依据不完善，计算方法的可行性和可靠性仍需进一步验证，模拟计算不能很好地为电子枪结构的热设计及优化提供准确指导。

本文通过理论分析建立并模拟了一种阴极热子组件结构热模型；同时，设计并完成了阴极热子组件结构热测实验，获取了结构在不同热子加热功率下由内到外的温度场分布，丰富了阴极热子组件热状态数据库；进一步，通过误差分析，提出计算模型改进方案，通过迭代得到结构接触热阻等关键参数，最终获取一种高可靠的阴极热子组件结构热物理模型，为后续电子枪结构的热设计及优化提供有力支持。此外，本文提出了一种简易的接触热阻估算方法，该方法在一定温度范围内能够给出接触热阻的近似值，为星载行波管的热模拟提供了支持。

## 2 阴极热子组件结构热模型建立

本文研究的某星载行波管阴极热子组件结构如图 1 所示。它由热丝、填充粉、阴极饼、阴极筒、阴极支持筒、定位件、热屏筒、热子引线瓷、热子引线固定筒和镍管组成，其中热子烧结在填充粉中。由于阴极热子组件工作在高真空环境下，在它的热物理模型中，不存在流体，只存在热传导和热辐射两种热传递方式<sup>[10,11]</sup>。

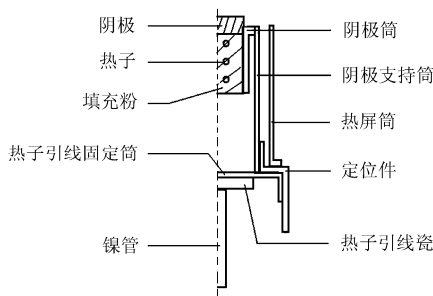


图 1 星载行波管阴极热子组件结构示意图

### 2.1 接触热阻估算模型

目前，针对阴极热子组件结构的热接触实验研究相对缺乏，主要以理论分析和数值模拟为主。在阴极热子组件结构中，零件之间大多以点焊组装为主(热子引线瓷采用了金属-瓷封接技术)，本文依据传热学理论，提出了一种针对点焊的热接触计算模型，该模型如图2所示。图中， $A$  为总的横截面积； $A_c$  为接触面积； $A_v$  为空隙面积； $L_g$  为空隙空间的厚度； $K_a$  为接触体 a 的导热系数； $K_b$  为接触体 b 的导热系数； $K_f$  为充满空隙空间流体的导热系数； $R$  为接触热阻； $T_a$  为接触体 a 的接触面温度； $T_b$  为接触体 b 的接触面温度，接触面积占总横截面积的百分比为  $C$ ，空隙面积占百分比为  $V$ 。在该热接触模

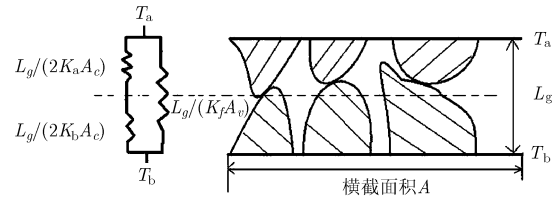


图 2 接触热阻简化模型

型中不存在流体换热，且忽略了接触区域中的辐射热传递，只有固体之间的热传导。则根据傅里叶定律和接触热阻的定义式<sup>[18]</sup>可得

$$R = \frac{L_g}{2AC} \left( \frac{1}{K_a} + \frac{1}{K_b} \right) \quad (1)$$

以阴极筒-阴极支持筒接触热阻为例，它的求解方法如下：(1)通过查找资料获取阴极筒(它的材料为金属钼)、阴极支持筒(它的材料为钨铼合金)的热传导系数，它们都是温度的函数<sup>[19]</sup>；(2)由结构的实际尺寸确定接触区域的径向横截面积  $A$ ；(3)假设接触间隙径向均匀，根据阴极筒与阴极支持筒内径加工允差估测接触间隙  $L_g$  的值；(4)根据点焊半径与点焊数估测接触面积  $A_c$ ；(5)根据式(1)推导  $R$  值。由此得到阴极筒-阴极支持筒之间的接触热阻值为  $3 \times 10^{-3} \text{ (m}^2 \cdot \text{°C/W)}$ ，阴极支持筒-定位件之间的接触热阻值为  $6.3 \times 10^{-3} \text{ (m}^2 \cdot \text{°C/W)}$ 。

### 2.2 阴极热子组件结构热模拟

结构在 CAD 软件中完成实体建模，模型导入 ANSYS 软件中进行计算；考虑热子为复绕式双螺旋结构，为建模简便，在模型中去掉了热子结构，将热子加热功率等效为体生热率，均匀加载在填充粉上；考虑多组面面辐射及空间辐射，并将材料辐射率及导热率设置为温度的函数，以表格形式加载；将阴极热子组件的镍管底面温度约束为  $80\text{°C}$ ；采用瞬态热分析模块进行模拟。图 3 给出了热子加热功率为  $3.3 \text{ W}$  时结构的温度场分布。

通过模拟计算阴极热子组件结构的温度特性，可以初步得出：阴极热子组件结构的温度变化剧烈，其中，阴极-热子结构的温差不大，而在阴极支持筒上面的温度梯度最为显著。

## 3 热测实验

### 3.1 实验设计

实验的目的是获取一系列热子加热功率下阴极热子组件结构由内到外的温度场分布，以验证和优化阴极热子组件结构热模拟；同时，完善某星载行波管热测数据库，以更好地服务于行波管的研发设计。

热测实验分 3 个阶段，对应组件的 3 个组装步

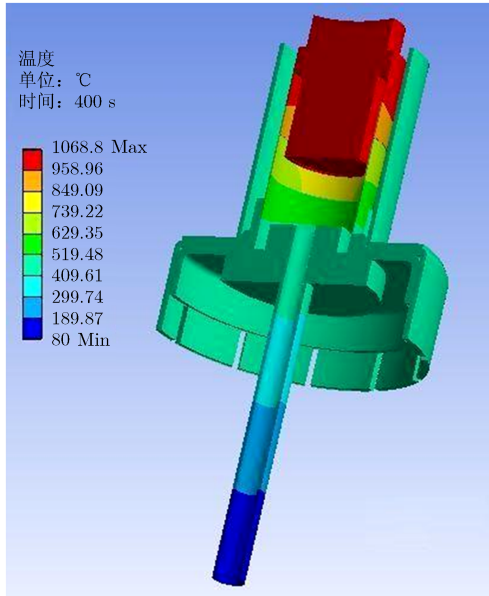


图 3 热子加热功率为 3.3 W 时阴极热子组件结构温度场分布

骤，以便系统地得到阴极热子组件结构由内到外的温度分布。实验中用到的主要工具包含：恒流源、导线、真空玻璃罩、万用表、光学测温仪、热电偶、数字计数器、导线以及由机械泵、分子泵和离子泵组建的抽真空平台。其中，恒流源为热丝提供一定的加热功率；抽真空平台和真空玻璃罩为测试对象提供高真空度的实验环境；万用表测量在真空玻璃罩输入钨棒上的电压；光学测温仪测量 600°C 以上的温度点，这些温度点具有鲜明的外在特征(发红)；热电偶用以测量 600°C 以下的温度点(不发光)；数字计数器用以读取热电偶测量结果<sup>[20]</sup>。表 1 给出了部分光学测温仪及热电偶的规格参数。

### 3.2 误差分析

阴极热子组件结构热模拟结果与实测结果对比表明：阴极温度最大计算误差为 6.4%，阴极支撑部件上的最大计算误差为 204°C，热模型需要进行优化。产生误差的来源有实验误差和计算误差。其中，实验误差主要包含热电偶探头与测量目标的接触热阻引起的测量误差，以及测量仪器本身存在的测量误差。计算误差主要由以下几个因素引起：

(1)热边界设置不当引起的计算误差。阴极热子组件结构通过镍管和定位件固定在实验装置中，在

计算模型中，定位件固定端的温度约束没有考虑。

(2)接触热阻的估算模型引起的误差。该估算方法忽略了辐射传热，及由升温引起的接触状态的变化。

(3)模型的简化引起的误差。阴极-热子结构的热源为通电的热子，填充物为  $Al_2O_3$  粉。在模型中忽略了热子，将填充物作为热源，在它上面施加等效的体生热率  $q_d$ 。该方法忽略了热子引腿上的热量损耗  $q_c$ ，则有效的加载功率  $q_p$  和仿真加载的功率  $q_s$  如式(2)和式(3)所示。

$$q_p = q_d - q_c \tag{2}$$

$$q_s = q_d \tag{3}$$

此外，ANSYS 网格、辐射因子等精度的设置也会影响计算结果。

## 4 阴极热子组件结构热模型优化

### 4.1 热模型改进

根据误差分析，对阴极热子组件结构的热模型进行优化，热模型做如下调整：

(1)通过实测获取定位件固定端的温度 (310°C)，将其作为温度边界约束加载在热模型中。

(2)利用加载在阴极-热子上的有效功率值  $q_p$  来修正模型的加热功率，如式(4)和式(5)所示。其中， $L$  为热子总长度， $l$  为热子引腿长度， $R_L$  和  $R_l$  分别对应两者的电阻， $I$  为热子通电电流， $\eta$  为热子有效加热效率， $q_d$  为电流源加载在真空玻璃罩输入端口的功率值。

$$\eta = 1 - \frac{I^2 R_l}{I^2 R_L} = 1 - \frac{l}{L} = 0.92 \tag{4}$$

$$q_p = q_d \eta \tag{5}$$

(3)依据实验和仿真，计算结构中的关键接触热阻参量。

由前文结构温度场计算结果(图 3)可知，阴极热子组件结构的温度场梯度在阴极支持筒上变化最为显著，阴极支持筒几乎决定了结构热传导的特性，因此，显著影响阴极热子组件结构温度梯度的热接触主要为阴极筒-阴极支持筒和阴极支持筒-定位件两部分。

下面针对这两组热接触的接触热阻提出了一种

表 1 部分光学测温仪及热电偶的规格参数

仪器	型号	测温范围	测量误差	
光学测温仪	PV11AF1	600°C – 3000°C	±10°C	
热电偶	KMTXL-MO50G-150	0°C – 600°C	475°C 以下	±0.1°C
			475°C – 600°C	4%

修正算法, 该方法以模拟计算和实测结果为依据, 通过迭代法得到接触热阻值的大小。该迭代方法的依据如下: 在优化了阴极热子组件结构热物理边界和激励后, 接触热阻计算值设置不当就成为了引起系统计算误差的主要原因。理论上讲, 当接触热阻计算值与实际值相等时, 结构的温度场计算结果与测试结果会基本一致。由此, 我们可以通过改变接触热阻计算值的大小, 当接触区域附近的温度场模拟结果(温度值与分布特点)与实测结果基本相同时, 就近似得到了接触热阻的实测值, 再通过整个系统温度场计算结果与实测结果比较, 判断系统计算误差是否在可接受范围内, 以最终确定该方法是否可靠。

以阴极筒-阴极支持筒热接触为例, 对接触热阻的求解进行说明。阴极筒与阴极支持筒接触区域相对结构尺寸很小, 且由实测结果可知, 阴极筒整体温差很小, 因此, 可近似认为在接触区域内两者轴向温度没有变化, 即轴向不存在热传递, 只存在径向的热传导。考虑结构的轴对称特征, 阴极筒-阴极支持筒热接触模型可用图 4 描述。

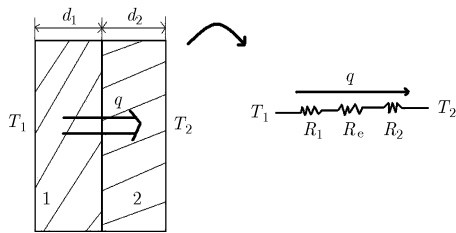


图 4 阴极筒-阴极支持筒热接触模型

其中,  $T_1, T_2$  分别为阴极筒和阴极支持筒上对应测量点的温度;  $d_1, d_2$  分别为阴极筒与阴极支持筒壁厚;  $q$  为两者间的热流密度;  $R_1, R_2$  分别为阴极筒和阴极支持筒研究区域的热阻,  $R_c$  为两者间的接触热阻。记  $k$  为材料热导率, 则它们之间的关系可用式(6)-式(9)描述:

$$q = (T_1 - T_2) / (R_0 + R_c) \tag{6}$$

$$R_0 = R_1 + R_2 \tag{7}$$

$$R_1 = d_1 / k_1 \tag{8}$$

$$R_2 = d_2 / k_2 \tag{9}$$

若将实验测得的数据用下标 e 标记, 将计算所得数据用下标 c 标记, 则有

$$q_e = (T_{1e} - T_{2e}) / (R_0 + R_c) \tag{10}$$

$$q_c = (T_{1c} - T_{2c}) / (R_0 + R_c) \tag{11}$$

若令  $q_e$  和  $q_c$  相等, 则  $R_{0e}$  与  $R_{0c}$  之间的关系可用式(12)

表述。此时式(12)右边的变量均为已知量。

$$R_{0e} = \left( \frac{T_{1c} - T_{2c}}{T_{1e} - T_{2e}} - 1 \right) R_{0c} + \frac{T_{1c} - T_{2c}}{T_{1e} - T_{2e}} R_{0c} \tag{12}$$

根据式(12), 对接触热阻进行迭代求解, 首先利用式(12)推导出的接触热阻值进行结构的热计算, 更新温度计算结果  $T_{1c}$  和  $T_{2c}$ , 与实测结果进行对比, 若误差可接受, 则说明已得到接触热阻近似值; 若相差较大, 则进入下一个迭代, 直到温度计算结果与实测结果基本相等。迭代的步骤用图 5 描述。由热传导傅里叶公式可知, 在相同激励和边界条件下, 接触热阻值的大小会影响结构温度场分布, 不同的接触热阻对应结构不同的温度场。因此, 这种实验与仿真迭代结合的接触热阻计算方法是可行的, 它的解是存在且唯一的。

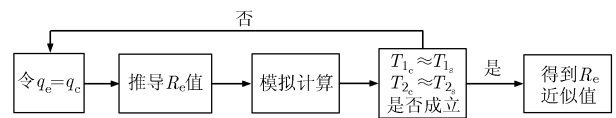


图 5 接触热阻迭代算法

需要注意的是, 在迭代算法中, 阴极筒-阴极支持筒与阴极支持筒-定位件的接触热阻是同时计算和迭代的, 这样既满足了在测量点处温度模拟与实测相同, 又保证了在阴极支持筒结构上的温度分布与实测值的一致性。通过上述迭代, 最终确定了阴极筒-阴极支持筒与阴极支持筒-定位件的接触热阻值的大小, 结果在图 6 和图 7 中给出。

阴极支持筒-定位件之间的接触热阻随温度升高而单调递减, 变化显著, 这是由于结构受热后因热膨胀产生应力, 使接触区域受到挤压, 从而减小了传导路径长度, 增加了接触面积, 最终导致接触热阻降低; 另一方面, 接触热阻不可能无限制地减小, 它总是一个正数, 因此, 接触热阻随温度的变化曲线为先陡后缓。高温下缝隙间的辐射传热显著, 因此阴极筒-阴极支持筒的接触热阻要远小于阴极支持筒-定位件之间的接触热阻, 且随着温度的升高略有降低。由于在实验和计算中存在一些不可避免的误差, 如测量误差、模型简化、网格误差等, 这些误差对接触热阻的计算会产生一定的影响, 尤其是接触热阻非常小时, 引起它随温度的变化曲线产生抖动, 对于阴极支持筒-阴极筒的接触热阻而言, 在该数量级下的数值抖动是可以接受的, 对后续系统的热模拟几乎没有影响。

对比接触热阻估算模型得到的阴极筒-阴极支持筒之间的接触热阻值 ( $3 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{C/W}$ ) 与阴极

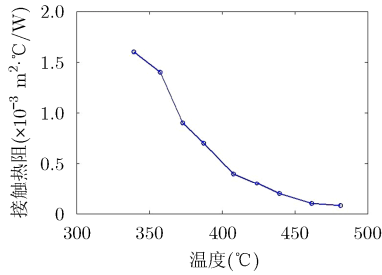


图 6 阴极支持筒-定位件之间的接触热阻

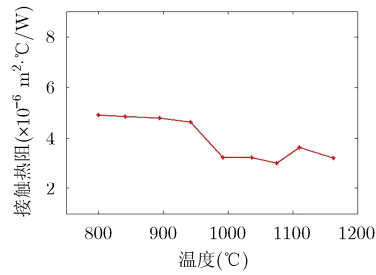


图 7 阴极筒-阴极支持筒之间的接触热阻

支持筒-定位件之间的接触热阻值 ( $6.3 \times 10^{-3} \text{ m}^2\text{C/W}$ ), 可知, 阴极支持筒-定位件之间的接触热阻值相对比较接近, 而阴极筒-阴极支持筒之间的接触热阻值相差 3 个量级。这是由于模型计算的接触热阻值没有考虑由升温引起的接触状态的变化, 及辐射传热的影响, 当接触区域温度不高时, 估算值与真实值较接近, 当温度较高时, 估算值误差很大, 由对比结果可推断, 简易估算模型可以近似给出 300°C 以内的接触热阻值。

#### 4.2 热模型优化结果

在完成了阴极热子组件结构热模型的激励、边界和接触热阻参数优化后, 重新对结构热模型进行了数值模拟, 计算结构在一系列热子加热功率下系统的温度场分布, 并与实测结果进行了对比。图 8 对比了阴极温度-加热功率曲线的模拟结果与实测结果, 图 9 对比了优化前后结构的温度最大计算误差。

结果表明, 阴极温度的最大计算误差由 6.4% 降低为 5%, 结构整体的最大温度计算误差由 204°C 降低为 72°C。利用均方根误差 (Mean Square Error, MSE) 对热模型优化前后的模拟精度进行描述, 通过式 (13) 统计阴极热子组件结构整体及阴极的温度均方根误差, 结果在表 2 中给出。可知, 阴极热子组件结构热模型的可靠性有了显著的提高, 满足星载行波管热模拟的需求, 同时也证明了接触热阻迭代算法的可行性。

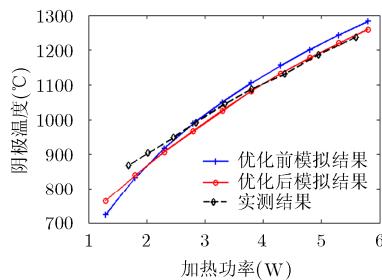


图 8 阴极温度实测数据与计算结果对比

$$MSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [y(i) - y_o(i)]^2}{N}} \quad (13)$$

表 2 阴极热子组件结构热模型温度均方根误差

热模型	总的 MSE(°C)	阴极的 MSE(°C)
优化前	105.9	30.3
优化后	38.6	23.2
优化效率(%)	63.5	23.4

#### 5 结束语

该文针对星载行波管阴极热子组件结构的热学特性开展了研究, 通过理论分析、数值模拟和实验验证相结合的方法提出了一种高可靠的阴极热子组件结构热模型。首先, 从系统的激励、热传递方式和热边界 3 方面展开讨论, 重点对结构的接触热阻进行了分析, 提出了一种简易的接触热阻估算模型, 并对阴极热子组件结构进行了热模拟; 然后, 设计并实现了阴极热子组件结构热测试实验, 首次获取了不同热子加热功率下结构由内到外的温度场分布, 丰富了阴极热子组件热状态数据库。在此基础上, 开展了结构热模型的优化, 对结构热模型的激励和边界条件进行了修正, 并使用实验-模拟相结合的研究方法, 迭代得到结构关键接触热阻参数。对新的热模型进行计算, 并与实测数据进行对比。结果表明: 新的阴极热子组件结构热模型阴极温度计算误

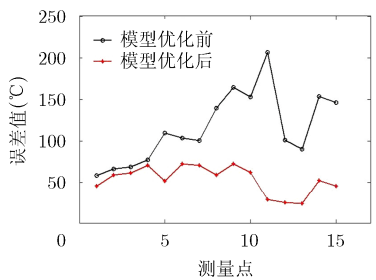


图 9 阴极热子组件结构温度最大计算误差

差在5%以内,均方根误差为 $23.2^{\circ}\text{C}$ ,结构总的温度计算误差不超过 $72^{\circ}\text{C}$ ,均方根误差为 $38.6^{\circ}\text{C}$ ,该计算模型的精度满足星载行波管热模拟的需求,为星载行波管阴极热子组件及电子枪结构的热设计和优化提供了一种可靠性高的模拟计算方法。

### 参考文献

- [1] 唐康淞, 赵刚, 李实, 等. 新型高导热螺旋线慢波结构的设计和仿真分析[J]. 电子与信息学报, 2009, 37(3): 736-739. doi: 10.3724/SP.J.1146.2007.01761.  
TANG Kangsong, ZHAO Gang, LI Shi, *et al.* Design and simulation analysis of novel helical slow-wave structure with high heat transfer[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(3): 736-739. doi: 10.3724/SP.J.1146.2007.01761.
- [2] 韩勇, 刘燕文, 丁耀根, 等. 螺旋线行波管慢波系统的综合热分析法[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(12): 3105-3108. doi: 10.3724/SP.J.1146.2008.01506.  
HAN Yong, LIU Yanwen, DING Yaogen, *et al.* Synthetic analysis method of the heat dissipation capability of slow-wave structure for helix TWT[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(12): 3105-3108. doi: 10.3724/SP.J.1146.2008.01506.
- [3] 韩勇, 刘燕文, 丁耀根, 等. 螺旋线镀膜对慢波组件散热性能影响的研究[J]. 电子与信息学报, 2008, 30(8): 2029-2032. doi: 10.3724/SP.J.1146.2007.00137.  
HAN Yong, LIU Yanwen, DING Yaogen, *et al.* Effect of plated helix on heat dissipation capability of the slow-wave circuit[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 30(8): 2029-2032. doi: 10.3724/SP.J.1146.2007.00137.
- [4] LI Xinwei, YU Shiji, and SU Xiaobao. The modeling and mesh of a simple cathode-heater assembly structure[C]. IEEE International Vacuum Electronics Conference, Paris, 2013: 1-2. doi: 10.1109/IVEC.2013.6571162.
- [5] OZTURK A E, TURKOZ E, OZGEN A, *et al.* Design and thermal analysis of the insert region heater of a lanthanum hexaboride hollow cathode[C]. 6th International Conference on Recent Advances in Space Technologies, Istanbul, 2013: 607-612. doi: 10.1109/RAST.2013.6581282.
- [6] GAHLAUT V, SHARMA R K, and SRIVASTAVA V. Thermal and structural analysis of electron gun for high efficiency space TWT[C]. International Conference on Emerging Trends in Electronic and Photonic Devices & Systems, Varanasi, 2009: 409-412. doi: 10.1109/ELECTRO.2009.5441081.
- [7] YAO Lieming, YANG Zhonghai, LI Bin, *et al.* Thermal-structural analysis of electron gun with control grid[C]. IEEE International Vacuum Electron Sources, Monterey, 2006: 139-140.
- [8] SU Wei, ZHU Junhua, LIU Renhuai, *et al.* Thermal-structural coupling analysis of electron gun in air-borne TWT [C]. International Conference on Reliability, Maintainability and Safety, Guangzhou, 2014: 913. doi: 10.1109/ICRMS.2014.7107336.
- [9] YAO Liucong, SU Xiaobao, and LU Wei. Thermal analysis of the gridded electron-gun[C]. IEEE International Vacuum Electronics Conference, Monterey, 2010: 163-164. doi: 10.1109/IVELEC.2010.5503551.
- [10] 宋芳芳, 张国兴, 何小琦, 等. 行波管阴极组件动态热耗散分析及优化设计[J]. 真空科学与技术学报, 2006, 26(2): 118-122. doi: 10.13922/j.cnki.cjovst.2006.02.010.  
SONG Fangfang, ZHANG Guoxing, HE Xiaoqi, *et al.* Dynamic thermal dissipation of cathode module in electron gun of traveling wave tube[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2006, 26(2): 118-122. doi: 10.13922/j.cnki.cjovst.2006.02.010.
- [11] 鲍际秀, 王佩筠, 万宝, 等. 阴极热丝组件中辐射换热量的改善[J]. 真空科学与技术学报, 2007, 27(6): 522-530. doi: 10.13922/j.cnki.cjovst.2007.06.015.  
BAO Jixiu, WANG Peijun, WAN Bao, *et al.* Radiant heat loss reduction of filament-cathode module[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2007, 27(6): 522-530. doi: 10.13922/j.cnki.cjovst.2007.06.015.
- [12] 赵兴群, 张国兴, 谢凯, 等. 行波管电子枪热状态模拟和分析[J]. 中国工程科学, 2005, 7(1): 33-37.  
ZHAO Xingqun, ZHANG Guoxing, XIE Kai, *et al.* The analysis and simulation for the thermal condition of electron gun of TWT[J]. *Engineering Sciences*, 2005, 7(1): 33-37.
- [13] 刘磊, 阮九福, 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.  
LIU Lei, RUAN Jiufu, YANG Jun, *et al.* Thermal analysis and structural optimization of electron gun for traveling wave tube[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(12): 3421-3425.
- [14] 胡太康, 俞世吉, 孟鸣凤, 等. 组件与非组件式热阴极的热特性分析[J]. 强激光与粒子束, 2007, 19(3): 477-482.  
HU Taikang, YU Shiji, MENG Mingfeng, *et al.* Thermal analysis of assembly and non-assembly cathodes[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(3): 477-482.
- [15] 程诚, 程道喜, 郑曙昕, 等. 新型热阴极电子枪加热结构热分析[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(7): 1607-1609.  
CHENG Cheng, CHENG Daoxi, ZHENG Shuxin, *et al.* Thermal analysis of heating structure for thermionic cathode electron gun[J]. *High Power and Particle Beams*, 2010, 22(7): 1607-1609.
- [16] 许升, 胡权, 黄桃, 等. 行波管电子枪组件的热及形变分析[J]. 真空电子技术, 2011, 8(2): 9-12.

- XU Sheng, HU Quan, HUANG Tao, *et al.* Thermal and deformation analysis of electron gun for traveling wave tubes[J]. *Vacuum Electronics*, 2011, 8(2): 9-12.
- [17] 翟亮, 俞世吉. 热屏开槽对行波管阴极-热子组件热学性能的影响[J]. *科学技术与工程*, 2011, 11(19): 4464-4468.
- ZHAI Liang and YU Shiji. Improvement on thermal property of cathode-heater assemblies in traveling wave tube by opening groove at heat shield[J]. *Science Technology and Engineer*, 2011, 11(19): 4464-4468.
- [18] 杨世明, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 47-49.
- YANG Shiming and TAO Wenqun. Heat Transfer[M]. Beijing: High Education Press, 2006: 47-49.
- [19] 谭拴斌, 郭让民, 杨升红, 等. 钼铼合金的结构和性能[J]. *稀有金属*, 2003, 27(6): 788-793. doi: 10.13373/j.cnki.cjrm.2003.06.029.
- TAN Shuangbin, GUO Rangmin, YANG Shenghong, *et al.* Structure and properties of molybdenum-rhenium alloys[J]. *Chinese Journal of Rare Metals*, 2003, 27(6): 788-793. doi: 10.13373/j.cnki.cjrm.2003.06.029.
- [20] 姚刘聪. 栅控电子枪的技术研究[D]. [硕士论文], 中国科学院大学, 2009.
- YAO Liucong. Study on the technique of gridded electron-gun[D]. [Master dissertation], University of Chinese Academy of Sciences, 2009.
- 李鑫伟: 男, 1989年生, 博士生, 研究方向为空间行波管热效率与可靠性技术.
- 俞世吉: 男, 1970年生, 研究员, 研究方向为微波电真空器件阴极及空间行波管阴极热子组件技术.
- 苏小保: 男, 1963年生, 研究员, 研究方向为微波电子学、低温等离子体及应用.
- 方有维: 男, 1986年生, 助理研究员, 研究方向为微波电真空器件阴极及空间行波管阴极热子组件技术.
- 孟鸣凤: 女, 1981年生, 工程师, 研究方向为微波电真空器件阴极及空间行波管阴极热子组件技术.
- 邢艳荣: 女, 1980年生, 研究方向为微波电子学.
- 刘柳平: 女, 1981年, 高级工程师, 研究方向为微波电子学.