

螺旋线行波管慢波系统的综合热分析法

韩勇^{①②} 刘燕文^① 丁耀根^① 刘濮鲲^①

^①(中国科学院电子学研究所中国科学院高功率微波源与技术重点实验室 北京 100190)

^②(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要: 该文提出了一种研究螺旋线行波管慢波系统散热性能的综合分析方法。该方法以一定的预备实验为前提条件,利用理论公式推算出接触处的界面热阻率,使用仿真软件进行精确的模拟研究。该方法可以准确的反映慢波系统的散热性能,可以降低实验成本,节约材料,节省实验时间。通过对采用氧化铍夹持杆、氮化硼夹持杆和镀铜螺旋线的慢波组件的研究,验证了该方法的一致性和可行性。

关键词: 行波管; 慢波系统; 散热性能; 温差; 界面热阻率

中图分类号: TN124

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)12-3015-04

Synthetic Analysis Method of the Heat Dissipation Capability of Slow-Wave Structure for Helix TWT

Han Yong^{①②} Liu Yan-wen^① Ding Yao-gen^① Liu Pu-kun^①

^①(Key Laboratory of High Power Microwave Sources and Technologies, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

^②(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: A novel, effective and synthetic analysis method is developed for studying the heat dissipation capability of slow-wave structure. This method, based on some theoretical and experimental research, is applicable to analyze the thermal conduction precisely and truly. This method can reduce the material costs and save the involved time. The consistency and the feasibility of this method are verified by some experimental tests on the slow-wave structures with BeO support rods, BN support rods and copper-plated helix.

Key words: Traveling Wave Tube (TWT); Slow-Wave Structure (SWS); Heat dissipation capability; Temperature difference; Thermal interface resistivity

1 引言

螺旋线行波管是一种具有宽频带的微波管,它被应用于众多的领域。螺旋线行波管慢波结构的散热性能一直是制约其平均功率提高的重要因素。另外,慢波结构的散热能力还会影响到行波管工作时的稳定性和可靠性^[1-3]。为了改善螺旋线行波管的性能,需要对慢波结构的散热问题进行深入和细致的研究。各种研究方法层出不穷,从理论的计算推理,到模拟仿真,再到实验测评。本文提出并验证了一种研究慢波系统散热性能的综合分析方法。该方法适当地结合了理论推论、实验测评和软件模拟,可以精确地研究慢波系统的热传导情况,并可以提高效率,节省开销。

2 慢波系统的热分析

当螺旋线行波管工作时,螺旋线由于高频损耗和聚焦特性不好的电子注轰击而受热,这部分热量

由夹持杆传送到管壳,然后耗散出去^[4]。慢波结构中的热量主要以热传导为主要传热方式。本文主要针对普遍使用的矩形夹持杆慢波系统进行热分析。热分析模型如图 1 所示。

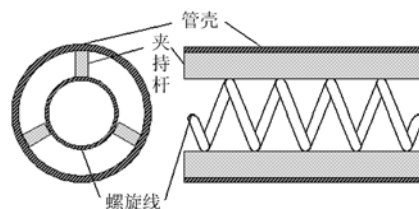


图 1 螺旋线行波管慢波系统的模型

热传导的基本公式为

$$Q = kA \frac{\Delta T}{\delta} \quad (1)$$

其中 Q 为流过的热量, k 为热导率, ΔT 为温差, δ 为导热路径的长度, A 为导热面积。

由式(1)出发分析慢波系统的传热情况,可以得

到各个组件上的温度差表达式。由于慢波结构的对称性,可以对图1所示的模型进行一维近似^[5,6]。

螺旋线上的温度可以近似认为相对于夹持杆呈对称分布。根据这个特点进行推算,得到螺旋线上的温度差表达式:

$$\Delta T_h = \frac{\pi r p}{2N^2 c w k_h \cos \phi} W \quad (2)$$

其中 k_h 为螺旋线材料的热导率, r 为螺旋线的平均半径, p 为螺距, w 为螺旋线的带宽, c 为螺旋线的厚度, ϕ 为螺旋线的螺距角, W 为单位长度上的功率耗散, N 为慢波结构中夹持杆的数目。

对于慢波结构中的夹持杆,主要考虑其径向的热传导。可以得到单根夹持杆上的温度差表达式为

$$\Delta T_r = \frac{2hp}{b(w+p)k_r N} W \quad (3)$$

其中 k_r 为夹持杆材料的热导率, h 为夹持杆的高度, b 为夹持杆的宽度。

同样考虑管壳上热量在径向上的传导情况。可以得到管壳上温度差的表达式为

$$\Delta T_s = \frac{\pi(R_2 - R_1)}{R_1 N k_s \arcsin(b/2R_1)} W \quad (4)$$

其中 k_s 为管壳材料的热导率, R_1 为管壳的内半径, R_2 为管壳的外半径。

螺旋线与夹持杆接触处、管壳与夹持杆接触处的接触热阻对慢波系统的热传导具有重要的影响^[7]。由于接触热阻的存在,在实际的接触面上会出现一定的温度差,该温差会占到整个系统温度差的50%以上。在进行慢波系统的热分析时,接触热阻的准确性和真实性直接影响到分析的可靠程度。

为了分析接触热阻的影响,引入了界面热阻率,界面热阻率越大,对接触处的热传导的阻碍作用越强,接触处引起的温差会越大。可以将由界面热阻率引起的温度差表示为以下通式^[8]:

$$\Delta T = \frac{W \rho}{NA} \quad (5)$$

其中 ρ 为接触处的界面热阻率, A 为接触面积。

分析图1中所示的慢波系统的模型,假设夹持杆与螺旋线和管壳良好接触,可以根据式(5),推算出各个接触面处界面热阻率引起的温度差的表达式。

对于螺旋线与夹持杆接触处,其温差可以表示为

$$\Delta T_1 = \rho_1 \frac{p}{Nwb} W \quad (6)$$

其中 ρ_1 为螺旋线与夹持杆处接触面的界面热阻率。

对于夹持杆与管壳的接触处,其温差可以表示为

$$\Delta T_2 = \rho_2 \frac{1}{Nb} W \quad (7)$$

其中 ρ_2 为管壳与夹持杆处接触面的界面热阻率。

界面热阻率主要跟接触处的材料的热导率、表面粗糙程度和硬度有关系,还跟接触面积和接触处受到的压力有关系。可以利用楔形接触模型分析慢波系统中的接触情况^[9]。在螺旋线慢波系统中,可以认为螺旋线与夹持杆接触处、以及管壳和夹持杆接触处所受到的压力近似相同。当组件的温度发生变化时,接触处的压力随温度的变化比较微弱,可以认为始终保持定值。由此可以得到 ρ_1 与 ρ_2 的关系式:

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{\sigma_1 k_2}{\sigma_2 k_1} \left(\frac{wH_1}{pH_2} \right)^{0.95} \quad (8)$$

其中,下标1代表螺旋线和夹持杆接触处,2代表管壳和夹持杆接触处, σ 为表面粗糙度的均方根值, k 为热导率的均方根值, H 为接触处较软材料的微硬度。 σ_1 , σ_2 , k_1 和 k_2 的计算公式为

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sqrt{\sigma_h^2 + \sigma_r^2}, \quad \sigma_2 = \sqrt{\sigma_r^2 + \sigma_s^2}, \\ k_1 &= \sqrt{k_h^2 + k_r^2}, \quad k_2 = \sqrt{k_r^2 + k_s^2} \end{aligned} \quad (9)$$

其中 σ_h , σ_r , σ_s 分别为螺旋线、夹持杆和管壳的表面粗糙度。

对于由相同结构、不同材料组成的慢波系统,当采用相同的装配方法时,可以认为相同接触处受到的压力基本相同。所以,如果得到了在接触处采用某种材料组合时的界面热阻率,就可以推算出在该接触处采用其他材料组合时的界面热阻率,推导公式为

$$\frac{\rho_a}{\rho_b} = \frac{\sigma_a k_b}{\sigma_b k_a} \left(\frac{H_a}{H_b} \right)^{0.95} \quad (10)$$

其中,下标 a 和 b 分别代表了在同一个接触处采用不同材料组合的两种接触情况。该式适用于推算采用相同的装配方法组装的不同材料组合的螺旋线慢波组件的界面热阻率。

3 散热性能的综合研究方法

由热分析的理论来指导实验,再由实验的结论来优化理论与模拟分析,最终得到一种准确而且有效的研究慢波系统散热性能的计算机模拟方法,该方法既可以节省时间,又可以节约材料,降低成本。本文首先对一种材料组合的慢波系统进行散热性能测评实验。在真空环境下,向螺旋线中提供逐渐增加的直流加热功率,使螺旋线升温,记录加入不同功率时螺旋线和管壳的温度^[10]。文献[10]对该散热性能实验测评体系的准确性和可行性进行了验证。

由前面的热分析可知，慢波系统由内到外的温度差可以表示为

$$\Delta T_{SWS} = \Delta T_h + \Delta T_r + \Delta T_s + \frac{pW}{Nwb} \rho_1 + \frac{W}{Nb} \rho_2 \quad (11)$$

由实验测得的螺旋线和管壳的温度可以得到加入不同功率时慢波结构的温度差 ΔT_{SWS} 。利用实验温度差和对应的耗散功率，联立式(8)和式(11)可以计算出 ρ_1 与 ρ_2 。使用多组实验数据进行推算后，取均方根值，便可以得到 ρ_1 与 ρ_2 的准确估算值。当慢波系统的温度变化时，表面的热阻率的变化十分微小，所以可以认为其为定值。将该估算值应用于 ANSYS 模拟研究，可以大大提高仿真的可靠性。

本文进行的预备实验是对由蒙乃尔管壳、氧化铍夹持杆与钼螺旋线组成的慢波结构进行研究。慢波系统采用热挤压的方法进行装配。利用上述方法，可以计算出： ρ_1 为 $5.102 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{Cm}^2/\text{W}$ ； ρ_2 为 $7.194 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{Cm}^2/\text{W}$ 。根据实际的慢波系统建立仿真模型，如图 2 中所示，按照实验情况设定仿真环境，引入两接触处界面热阻率，将模拟结果与实验结果进行对比如图 3 所示。



图 2 慢波结构的仿真模型图

由图 3 可以看出，模拟结果与实验结果十分吻合。模拟实验很好地反映了慢波系统的实际导热情况。经过多次的实验，可以得到十分一致的比较结果。

对于采用了相同装配方法的慢波系统，利用式

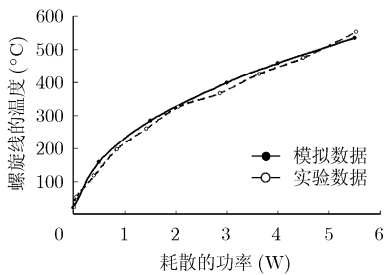


图 3 采用氧化铍夹持杆组件的散热性能比较图

(10)可以方便且准确的推算出采用其他不同材料组合时相同接触处的界面热阻率。

是否能够提供良好的散热性能是慢波组件选材时需要考虑的重要因素。对于夹持杆可以选择使用氧化铍、氮化硼、氮化铝、氧化铝和金刚石等。对于螺旋线可以选择使用钼丝、钨丝和铼钨丝等等。管壳可以选择使用蒙乃尔、弥散强化无氧铜、锆铜和不锈钢等等。为了使慢波结构的散热性能可以满足设计的要求，可以采用上述的方法进行材料的选取评测以及散热性能的评价。当慢波系统采用了相同的装配方法时，该方法同样适用于采用镀膜夹持杆与镀膜螺旋线的情况。下面根据不同的情况对该方法的可行性进行了验证。

4 不同情况时的实验比较验证

(1)采用氮化硼夹持杆 利用上述的方法研究采用了氮化硼夹持杆的慢波系统的散热性能。同样使用热挤压的方法装配慢波系统，根据式(10)，利用前面得到的界面热阻率，可以推算出，采用氮化硼夹持杆时慢波系统接触处的界面热阻率： ρ_1 为 $5.882 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{Cm}^2/\text{W}$ ； ρ_2 为 $11.111 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{Cm}^2/\text{W}$ 。设定模型的各个参数，进行研究对比，可以得到如图 4 所示的结果。

夹持杆材料的变化会影响到其与螺旋线、管壳两个接触处的界面热阻率。由图 4 可以看出，模拟结果与实验结构十分相符，两条曲线具有很好的一致性。

(2)采用钼带表面镀铜膜的螺旋线 当螺旋线的材料改变时，该方法同样适用。这里对采用了氧化铍夹持杆、镀铜膜螺旋线和蒙乃尔管壳的组件进行验证。在纯钼螺旋线的表面镀上薄铜膜，可以在一定程度上提高慢波系统的散热性能，降低高频损耗。此时，螺旋线与夹持杆接触处的情况发生了变化。同样利用上述方法来估测慢波系统的散热性能。经过推算，可以得到 ρ_1 为 $0.6598 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{Cm}^2/\text{W}$ ， ρ_2 为 $7.194 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{Cm}^2/\text{W}$ 。设定模型的各个参数，比较实验结果如图 5 所示。

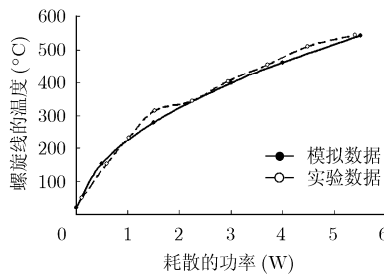


图 4 采用氮化硼夹持杆组件的散热性能比较图

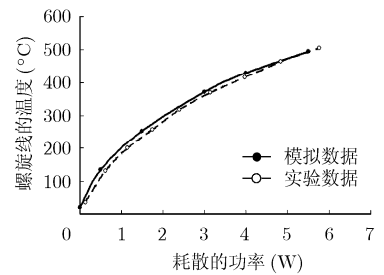


图 5 采用镀铜螺旋线组件的散热性能比较图

由图 5 可以看出, 只要是采用了相同的装配方法, 该方法也适用于改变螺旋线材料的情况。经过多次实验验证, 可以证明该方法具有良好的一致性, 可以用来研究各种材料组合时螺旋线慢波系统的散热性能。

5 结束语

本文提出了一种准确而有效的研究螺旋线慢波系统散热性能的综合研究方法。以预备实验为前提, 以理论推算为基础, 并运用了计算机模拟手段。该方法可以有效地计算出螺旋线和夹持杆, 以及管壳和夹持杆接触处的不同的界面热阻率。对于采用了同种装配方法的慢波组件, 只需要进行一种材料组合的实验, 就可以准确地仿真出采用其他材料组合时慢波系统的热传导情况。通过对采用氮化硼夹持杆和镀铜膜螺旋线的慢波系统进行研究, 验证了该方法的广泛适用性和可行性。利用该方法进行慢波系统散热性能的研究, 不仅可以有效真实地反映实际情况, 而且可以降低研究成本, 缩短研究时间, 为螺旋线行波管慢波系统的设计和性能改善提供重要的参考依据。

参 考 文 献

- [1] 韩勇, 刘燕文, 丁耀根等. 夹持杆的结构和尺寸对慢波结构散热特性影响的研究 [J]. 电子与信息学报, 2008, 30(5): 1267-1270.
Han Y, Liu Y W, and Ding Y G, *et al.* A study on the influence of the rods of different structures and dimensions on heat dissipation capability of the slow-wave structures [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2008, 30(5): 1267-1270.
- [2] Rocci P J. Thermal-structural reliability assessment of helix TWT interaction circuit using finite element analysis [C]. Aerospace and Electronics Conference, London, 1993(5): 731-737.
- [3] Ghosh T K, Challis A J, and Jacob A, *et al.* Improvements in performance of broadband helix Traveling-Wave Tubes [J]. *IEEE Transactions on Electronic Devices*, 2008, 55(8): 668-673.
- [4] Sauseng O and Manoly A E. Thermal properties and power capability of helix structures for millimeter waves [C]. International Electronic Device Meeting, New York, 1978: 534-537.
- [5] Harper R and Puri M P. Heat transfer and power capability of EHF helix TWTs [C]. International Electronic Device Meeting, Washington, 1986: 498-500.
- [6] Vemula Bhanu Naidu, Subrata Kumar Datta, and Raja Ramana Rao, *et al.* Analysis of sever-loss in a helical slow-wave structure [C]. IEEE International Vacuum Electronics Conference, London, 2008: 304-305.
- [7] Goren Y, Schram A, and Gagne D, *et al.* Accurate measurements of the dielectric properties of TWT BeO support rods [C]. IEEE International Vacuum Electronics Conference, New York, 2007: 141-142.
- [8] Crivello R. Thermal analysis of PPM-focused rod-supported TWT helix structures [J]. *IEEE Transactions on Electronic Devices*, 1988, 35(10): 1701-1720.
- [9] Kunkel S H and Peck W M. Predicting thermal contact resistance in circuit card assemblies [C]. InterSociety Conference on Thermal Phenomena, Texas, 1994: 91-100.
- [10] Han Yong, Liu Yan-wen, and Ding Yao-gen, *et al.* An evaluation of heat dissipation capability of the slow-wave structures [J]. *IEEE Transactions on Electronic Devices*, 2007, 54(8): 1562-1565.

韩 勇: 男, 1981 年生, 博士, 研究方向为螺旋线行波管慢波系统的散热性能。

刘燕文: 男, 1964 年生, 副研究员, 硕士生导师, 研究方向为电子发射。

丁耀根: 男, 1942 年生, 研究员, 博士生导师, 研究方向为高功率微波电子信息系统与器件、微波器件与电路的计算机模拟。

刘濮鲲: 男, 1965 年生, 研究员, 教授, 博士生导师, 研究方向为大功率微波毫米波器件、高功率微波与信息对抗技术。