

夹持杆的结构和尺寸对慢波结构散热特性的影响的研究

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 北京 100080)

^②(中国科学院研究生院 北京 100039)

摘要: 该文利用 ANSYS 软件对采用不同结构夹持杆的慢波组件的散热性能进行了分析。分别在稳态和瞬态两种情况下, 分析与比较了采用不同结构的夹持杆对慢波组件的散热性能的影响。得出了不同结构夹持杆在影响组件散热时的几个因素, 对慢波组件夹持杆结构和尺寸的设计有一定的参考作用。

关键词: 慢波结构; 夹持杆; 散热特性; 导热热阻

中图分类号: TN124

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)05-1267-04

A Study on the Influence of the Rods of Different Structures and Dimensions on Heat Dissipation Capability of the Slow-Wave Structures

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

^①(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

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

Abstract: ANSYS is used to analysis the heat dissipation capability of the slow-wave structures with different rods. The influence of the rods on heat dissipation capability is studied and compared separately under the steady and transient state. Several influencing factors are obtained, which could make some reference to the selection of suitable structures and dimensions of rods of the slow-wave structures.

Key words: Slow-wave structure; Support rod; Heat dissipation capability; Thermal resistance

1 引言

螺旋线行波管凭借其宽频带和高增益等方面的优点, 在电子对抗、雷达、通信和数据传输等领域得到了广泛的应用, 在当今微波真空电子器件中占据着重要的地位^[1]。在螺旋线行波管的各种特性中, 散热特性是非常重要的, 它不仅是决定行波管平均输出功率的主要因素, 也是直接影响着行波管工作的稳定性与可靠性的主要因素。当螺旋线行波管工作时, 螺旋线由于高频损耗和散焦的电子注轰击而受热, 这些热量如果不能及时有效地传出, 会使螺旋线的温度大幅度上升, 当温度过高时, 会导致平均输出功率的衰减, 导致慢波损耗的大幅增加, 甚至还可能造成整个行波管的损坏。有效地提高螺旋线上热量的散出, 可以提高其输出功率, 延长器件的使用寿命。

螺旋线行波管的慢波结构是由螺旋线、夹持杆和金属管壳组成的。其中, 夹持杆的作用主要有两方面, 一是支撑螺旋线结构, 使螺旋线得以妥善的固定在管壳内; 二是将螺旋线上的热量向外导出, 提供一个良好的散热通道。要提高散热, 除了减小接触热阻和使用导热率高的材料外, 还应该考虑到夹持杆的结构和尺寸的影响^[2]。

2 计算慢波组件的散热特性的理论和方法

慢波组件导热过程主要是固体的热传导过程, 导热必满足傅里叶定律:

$$dQ = -\lambda(\partial T / \partial n)dAd\tau \quad (1)$$

各组件物体的温度分布遵循导热微分方程式:

$$\partial t / \partial \tau = a \nabla^2 t + \Phi / (\rho c), \quad a = \lambda / (\rho c) \quad (2)$$

其中 a 为热扩散率, λ 为物体的热导率, ρ 为物体的密度, c 为物体的比热容。

在评价慢波结构的散热性能时, 可以给螺旋线提供恒定的热负载, 观察螺旋线、夹持杆与管壳达到热稳态时的温度。这是一种稳态传热的过程, 组件的导热遵循稳态热分析的能量平衡方程:

$$KT = Q \quad (3)$$

其中 K 为导热矩阵, T 为节点温度向量, Q 为节点热流率向量。

当热量传递达到稳态后, 观察螺旋线上的最高温度, 可以在一定程度上比较组件的散热能力。温度越低, 组件的散热能力越强。

另外, 也可以在向螺旋线中提供恒定热负载后, 观察螺旋线的温度随时间的变化关系。这是一种瞬态导热的过程, 组件的导热遵循瞬态热平衡表达式:

$$C\dot{T} + KT = Q \tag{4}$$

其中 K 为导热矩阵, C 为比热矩阵, T 为节点温度向量, \dot{T} 为温度对时间的导数, Q 为节点热流率向量。

通过记录螺旋线上最高温度的瞬时变化情况, 可以了解组件上热量的散出随时间的变化情况, 从而得知组件散热性能的好坏。

3 夹持杆结构和尺寸对散热特性的影响

当螺旋线的结构及材料, 管壳的结构及材料相同, 夹持杆与螺旋线和管壳的接触情况相同的情况下, 考察相同材料, 不同结构和尺寸的夹持杆对慢波组件散热特性的影响。

本文利用 ANSYS 软件, 对采用了如图 1 所示的圆柱型夹持杆、矩形夹持杆和 T 型夹持杆的慢波组件的散热性能进行模拟比较。这 3 种结构的夹持杆的制作工艺较简单, 夹持杆也易于装配, 所以得到了较为广泛的应用。另外, 这 3 种夹持杆与螺旋线和管壳的接触均可以认为是线接触。

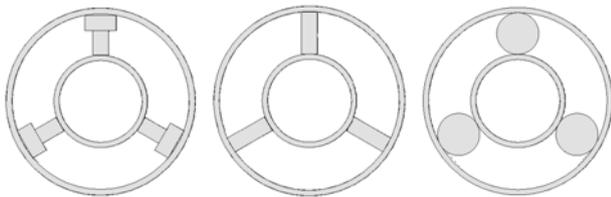


图 1 不同结构的夹持杆的结构图

首先, 考虑夹持杆有两处与管壳接触的情况, 即采用 T 型夹持杆和矩形夹持杆的情况。在固定边界条件和热负载的情况下分别对组件进行稳态和瞬态分析。

由于 T 型夹持杆是一端厚一端薄, 在与矩形夹持杆比较时, 采用了两种尺寸的矩形杆。一种的厚度与 T 型杆薄端相同, 一种的厚度与 T 型杆的厚端相同。厚杆的厚度是薄杆的两倍。对组件进行稳态分析得到如下的结果:

由图 2 和表 1 中可以看出使用 T 型夹持杆组件的散热能力强于使用薄矩形杆的组件, 而弱于使用厚矩形杆的组件。影响夹持杆传热的因素主要有: 夹持杆材料的热导率、夹持杆的导热热阻和夹持杆与各面的接触热阻。本文的模拟使用了 BeO 夹持杆、钨的螺旋线和 Monel 的管壳。这 3 个组件均是线接触, 接触处的情况基本相同。这样, 导致最终散热性能差别的因素应该就是夹持杆的导热热阻。

物体导热热阻的表达式为

$$dR_d = d\delta / (\lambda A) \tag{5}$$

其中 $d\delta$ 为导热路径, λ 为热导率, A 为导热面积。

T 型杆的导热面积在厚端要大于薄矩形杆, 所以导热热阻略小于薄矩形杆, 使得散热能力高于薄矩形杆一些。厚矩形杆的导热面积大于薄矩形杆, 又大于 T 型杆的薄端, 所以厚矩形杆的散热效果最好。另外, 对于同样尺寸大螺旋线和管壳, 夹持杆的宽度(即导热路径)是厚矩形杆最短, T 型杆

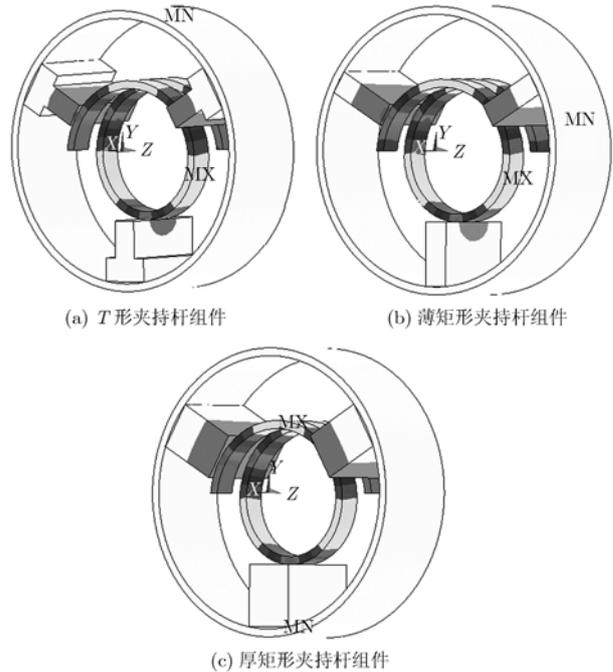


图 2 慢波组件稳态温度分布图

表 1 不同夹持杆时螺旋线最高和最低温度对照表

螺旋线的温度(°C)	T 型夹持杆组件	薄矩形夹持杆组件	厚矩形夹持杆组件
最高温度	412	421	383
最低温度	204	207	194

其次, 窄矩形杆最长。这些因素导致的几种夹持杆的导热热阻的差别, 从而影响了组件的散热性能。厚矩形杆虽然在导热面积和导热路径上有一定优势, 但其对散热效果的提高也不太显著。

对组件进行瞬态分析得到如下的螺旋线上的最高温度随时间的变化关系。

由图 3 中可知, 其结果与稳态分析时的结果是吻合的。使用了 T 型夹持杆的组件的导热速度快于薄矩形杆, 而慢于厚矩形杆, 从而使螺旋线上的最高温度随时间有图中的变化情况。同样, 采用了较厚的夹持杆对组件散热的作用也不大, 只是略有提高。

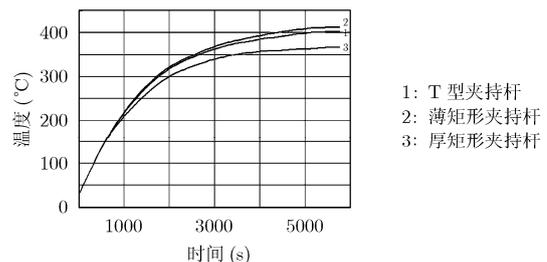


图 3 组件螺旋线最高温度随时间的变化关系图

由以上瞬态和稳态的分析可知, 对于线接触的情况, 加大夹持杆的厚度, 对组件散热性能的影响不大, 通过加厚夹持杆来提高散热的方法不是特别有效。

然后, 再考虑使用圆柱型夹持杆的情况。圆柱型夹持杆与管壳和螺旋线都只有一处接触, 均属于线性接触。在组件的材料以及管壳和螺旋线的尺寸不变的情况下, 对采用的圆柱夹持杆的阻件施加与以上相同的边界条件和热负载。

进行稳态分析得到组件温度分布图 4, 图 4 中螺旋线的最高温度为 393℃, 最低温度为 197℃。然后, 进行瞬态分析并将圆柱杆组件的最高温度变化关系与其他 3 个组件进行比较得到图 5。

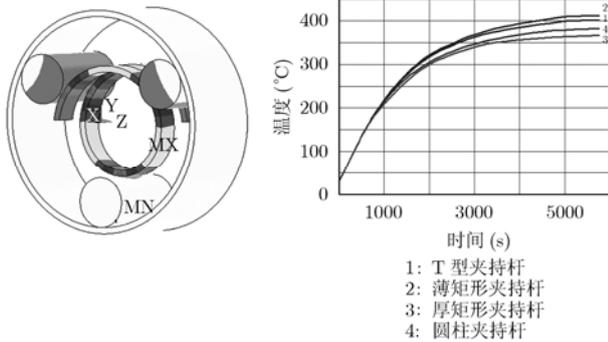


图 4 圆柱杆稳态温度分布图

图 5 组件螺旋线最高温度随时间的变化关系图

由图 4 和图 5 可以看出, 使用了圆形杆的组件的散热能力要强于 T 型杆和薄矩形杆的组件, 而弱于厚矩形杆的组件。主要原因应该是圆柱型夹持杆的平均导热面积比较大, 从而减小了导热热阻。但其导热能力还是不如使用了厚夹持杆的组件, 这是因为厚夹持杆在保证较大的导热面积和较短的导热路径的同时, 与管壳有两处接触的地方, 使螺旋线上的热量能够更快更多地传导到管壳, 从而散发出去。另外, 对于 T 型夹持杆, 如果使其厚端更厚更宽一些, 也可以提高其散热能力, 在一定尺寸时, 其散热能力应该是强于圆柱夹持杆的。

最后, 考虑当夹持杆与螺旋线和管壳是面接触时的情况。以上面使用的薄夹持杆的尺寸为模型, 进行一定的改动。将夹持杆的上或下端面改为圆弧形, 分别使夹持杆与螺旋线和管壳的接触成为面接触; 再使两端面都改为圆弧形, 从而得到两处都为面接触的情况。对上述的实验模型进行稳态和瞬态的热分析得到表 2、图 6 和图 7。

表 2 不同面接触时螺旋线最高和最低温度对照表

螺旋线的温度(℃)	螺旋线处面接触	管壳处面接触	螺旋线和管壳处均面接触
最高温度	315	408	303
最低温度	172	203	168

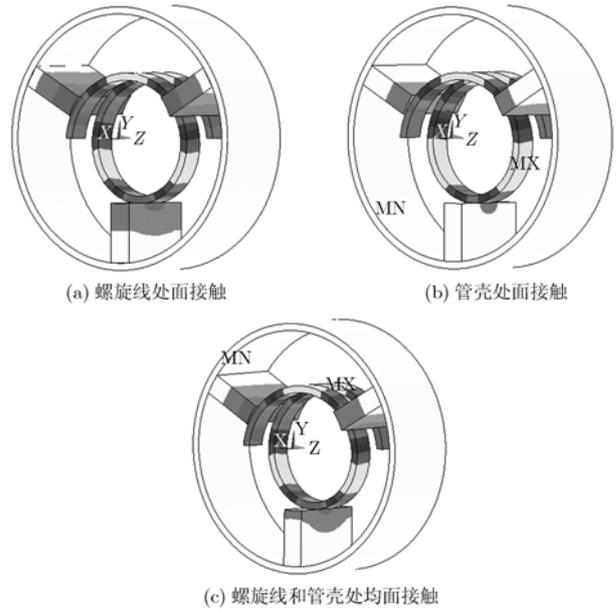


图 6 夹持杆面接触时组件稳态温度分布图

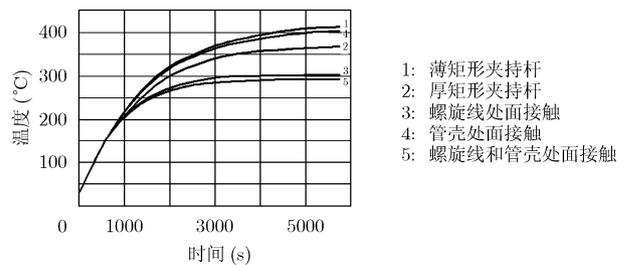


图 7 组件螺旋线最高温度随时间的变化关系图

由表 2 和图 6 中可以容易的看出, 夹持杆两处均是面接触时组件的散热能力最强, 其次是夹持杆和螺旋线面接触, 夹持杆和管壳面接触最差。也就是说, 夹持杆与螺旋线的接触状况对组件散热能力有着十分重要的影响。夹持杆与管壳是否是面接触对组件的散热能力只有一定的影响, 不是特别明显。这样, 为降低工艺的复杂度, 可以只将杆与螺旋线接触的面做成弧状, 也可以达到有效提高散热的目的。如图 7 所示, 将这 3 种情况与前面实验中的薄矩形杆和厚矩形杆的两种情况进行了比较。由图中可知, 面接触较好地提高了组件的散热性能。总之, 在提高组件的散热能力方面, 夹持杆与管壳和螺旋线的面接触比线接触有较大的优势, 而夹持杆与螺旋线的面接触又在其中起到了主要作用。

4 结束语

夹持杆的结构和尺寸对慢波组件的散热能力是有一定影响的。在其他条件相同的情况下, 夹持杆结构的厚度越大, 宽度越小, 对导热越有利。但在只考虑线接触的情况时, 厚度的变化对组件散热性能的影响并不明显, 只是略微提高, 所以在这种情况下通过加大厚度来提高组件散热的效率不高。若能对夹持杆结构的两端进行有效的处理, 使其与管壳

和螺旋线成为面接触,可以较大地提高散热性能。尤其是使夹持杆与螺旋线进行面接触,可以使组件得到很好的散热性能。增加接触面积能够进一步提高组件散热,但当接触面大到一定时,效果也变得不再显著了。在设计夹持杆时,考虑夹持杆结构和尺寸对慢波结构色散特性和耦合阻抗的影响,再结合夹持杆对散热特性的影响,应该可以设计出满足组件性能要求的结构和尺寸。

参 考 文 献

- [1] Chong C K, Davis J A, and Le Borgne R H, *et al.*. Development of high-power Ka-band and Q-band helix-TWTs. *IEEE Trans. on Electron Device*, 2005, 52(5): 653-659.
- [2] Dallos A, Smith B H, and Bowness C. Simulation of rod charging in TWT helix structures. *International Electron Devices Meeting*, 1989: 199-202.
- 韩 勇: 男, 1981年生, 博士, 研究方向为螺旋线行波管慢波结构的散热性能.
- 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.