

不同方法制备的螺旋线慢波组件的散热性能的研究

刘燕文¹, 韩 勇^{1,2}, 赵 丽¹, 王 莉¹, 于艳春¹,
王立新¹, 王 鑫¹, 赵建东¹, 王自成¹, 刘濮鲲¹

(1. 中国科学院电子学研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要: 利用电阻温度系数法对几种方法制备的慢波组件散热性能进行了实验研究, 结果表明石墨热挤压法、磁控溅射镀膜法及压力扩散焊接法和无变形热挤压法比冷弹压法和传统的钨钼带热挤压法制备的慢波组件散热性能强许多. 传统的石墨热挤压法可与无变形热挤压法制备的组件的散热能力相比拟, 但石墨热挤压法会引起慢波组件的两次变形, 使慢波组件的微波反射点增多增强. 压力扩散焊接法制备的慢波组件散热性能比溅射镀膜法制备的慢波组件散热性能稍强, 但压力扩散焊接法与溅射镀膜法相比具有更低的微波损耗. 这些结果为制备散热性能强的慢波组件提供了有益的实验结果.

关键词: 行波管; 螺旋线慢波组件; 散热性能; 挤压方法; 焊接方法

中图分类号: TN124 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2009) 08-1757-05

Study of Heat Dissipation of Slow-wave Structure Made by Different Technology

LIU Yan-wen¹, HAN Yong^{1,2}, ZHAO Li¹, WANG Li¹, YU Yan-chun¹,
WANG Li-xin¹, WANG Xin¹, ZHAO Jian-dong¹, WANG Zi-cheng¹, LIU Pu-kun¹

(1. The Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

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

Abstract: By using the method, employing the variation in resistance of helix with temperature, the heat dissipation capability of the helix traveling-wave tube slow-wave structure (SWS) made by several helix assembling methods have been tested. The results of this study have demonstrated that four assembling methods, i. e., the graphite wrapping method, the hot insertion method, the sputtering brazing method and the diffusion brazing method have better heat dissipation capability of the SWS than that of the cold compress method and the molybdenum wrapping method. The SWS made by hot insertion method has a smaller microwave reflecting than that of the graphite wrapping method. The diffusion brazing SWS have a little better heat dissipation capability and lower microwave losses than that of the sputtering brazing SWS. These results can lead to improved helix TWT designs and performance.

Key words: traveling-wave tube; helix slow-wave structure; heat dissipation; non-brazing helix assembling method; brazing helix assembling method

1 引言

宽带、高功率行波管是电子对抗、火控系统和通讯领域中起着关键作用的微波器件, 它的性能对这些军用和民用系统具有决定性作用, 慢波系统又是决定行波管性能的关键部件, 寻求宽带、高效和热导性能更好的慢波结构对满足目前国防需要以及未来的军事电子装备都是至关重要的. 在螺旋线型行波管的各种特性中, 热特性是一项非常重要的指标, 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^[1,2]. 当温度过高时, 不仅会导

致平均输出功率的衰减, 还可能造成整个行波管物理上的损坏. 在大功率连续波行波管的研制和生产过程中, 慢波组件散热性能直接影响器件的成品率和使用寿命. 因此螺旋线慢波组件的散热性能的研究成了提高行波管性能的一个重要研究方向^[3-5].

目前螺旋线行波管慢波组件制备方法主要有两大类, 即非焊接方法和焊接方法. 非焊接方法是将组件挤压在一起, 装配效果的好坏主要依赖于介质夹持杆与螺旋线界面, 介质夹持杆与金属管壳界面接触压力的大小和均匀性. 使用非焊接方法制备慢波组件时要注意介质夹持杆之间的角度不改变和螺旋线不变形^[6]. 日本 NEC

收稿日期: 2008-05-07; 修回日期: 2008-12-12

公司采用非焊接方法制备了 6GHz-3000W 和 14GHz-600W 两只螺旋线行波管,其增益和总效率分别为 36dB-24% 和 46dB-26%^[7].焊接方法是将介质夹持杆和螺旋线及金属管壳焊接在一起,这种方法极大的减少了介质夹持杆和螺旋线及金属管壳之间的接触热阻,从而降低了螺旋线上的温度.国内外有许多这方面的研究,法国 THCMSON 公司利用焊接方法制备了许多高增益高功率的螺旋线行波管^[8].国内有研究者利用真空蒸发镀膜技术在氧化铍夹持杆表面依次蒸发钼和铜,然后将镀膜后的介质夹持杆与钨螺旋线焊接,再采用冷挤压的方法将焊接后的组件挤入不锈钢管壳,通过对样管的测试,证明将介质夹持杆与螺旋线焊接后提高了慢波组件的散热性能^[9].

2 慢波组件的材料和制备方法

图 1 给出了螺旋线慢波结构示意图.

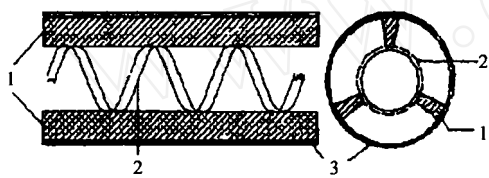


图1 螺旋线慢波结构示意图

介质夹持杆 1 和螺旋线 2 与金属管壳 3 组成慢波组件.管壳 3 的内壁与介质夹持杆 1 表面紧密接触,介质夹持杆 1 表面与螺旋线 2 外壁表面紧密接触.

2.1 材料的选择

选择能获得好的热特性的装配用材料的关键是:有较高的导热率;易于元件的装配以便不同材料之间的接触面具有高的导热性.前者的效果比较好理解,高的导热率将带来高的传导能力;但在实际中,后者比前者更为重要.

金属管壳需要具有足够的机械强度、无磁性、良好的热传导性和高温强度.通常选用蒙乃尔、弥散强化无氧铜、铍铜等材料来制作管壳.本实验中慢波组件的管壳使用蒙乃尔.蒙乃尔材料是以镍为主的镍铜合金,它具有高强度、延展性好、可焊性和优良的耐蚀能力.

螺旋线的材料通常选用熔点高、机械强度好的钼丝和钨丝、铍钨丝等.其中钼在行波管上的应用十分普遍.钼最明显的特点就是熔点和塑-脆转变点低,气体渗透性和析出性低,机械加工性能好.另外,现在许多研究机构对钼或钨的螺旋线表面镀铜或镀金,这样既可以改善慢波结构的高频损耗特性,也能够提高螺旋线散热能力.本实验中选用钼作为螺旋线材料.

夹持杆应具有低的介电常数、低的微波损耗、较高的机械强度和合适的导热能力^[10].常用作夹持杆的材料为石英、氧化铝、氧化铍、氮化硼、氮化铝等.本实验

中,慢波系统的夹持杆使用 BeO 材料.氧化铍瓷具有异常高的导热性能,其低温热导率是目前其它陶瓷所不能比拟的(常温下,热导率约为 230 W/m·K).

2.2 慢波组件的制备方法

本文利用冷弹压法、缠绕带热挤压法、石墨热挤压法、磁控溅射覆膜法及压力扩散焊接法和无变形热挤压法制备了慢波组件.

(1)冷弹压法——主要是针对环绕螺旋线,均匀分布有三个夹持杆的情况.它是在常温下利用管壳的弹性变形力加紧介质杆与螺旋线的方法.先将三根夹持杆与螺旋线固定在模具上,然后在管壳上加三个互相差 120 度的径向压力,将空心圆柱管壳截面变形为三角形,再将夹持杆与螺旋线组件中的三根夹持杆从管壳的突起中嵌入并逐步抽出模具,取消外部力,利用管壳自身的回复弹力,将夹持杆和螺旋带挤压在一起.利用此方法,管壳必须要选用弹性较好的材料,常用的有无磁蒙乃尔和不锈钢.

冷弹压法工艺较简单,夹持较牢固,能耐一定机械冲击和振动,适用于小直径管壳.因此,冷弹压法在功率不大的脉冲和连续波行波管制造中广泛采用.缺点是零件尺寸公差要求严格,散热能力较差,容易引起管壳变形.

(2)缠绕钼带法——该方法是冷挤压装配完组件后,用钼带缠绕管壳,对组件加高温,利用钼的膨胀系数小于管壳的膨胀系数,管壳材料向内挤压,从而达到组件接触更紧密的目的.

(3)石墨热挤压方法——它是利用低膨胀系数的挤压模(如石墨),在高温下限制管壳的径向膨胀,使塑性变形的管壳冷却后收缩,将夹持杆、螺旋线压紧,得到良好的接触.

工艺实现不算复杂,该方法与冷弹压法相比,在提高散热能力方面有明显优势.不过,该方法容易使管壳变形和造成慢波组件污染.

(4)无变形热挤压法——这项装配技术主要是利用热胀冷缩的原理,先将慢波结构的外部管壳加热以增加他的内径,再将螺旋线和夹持杆放入,然后将整个结构的温度恢复到室温,这时管壳的内径收缩,产生极大的收缩力,此力被施加到螺旋线和夹持杆部件中,同样将两者挤压在了一起.

以上几种装配技术的效果好坏主要依赖于螺旋线与绝缘夹持杆界面、夹持杆与金属管壳界面接触压力的大小和均匀性.

(5)磁控溅射覆膜焊接法——焊接技术是热处理中最吸引人的技术.这种技术极大地减少了夹持杆表面的热阻,从而减少了螺旋线上的最高温度.因此在螺旋线材料的选择方面有一个较宽范围,便于提高管子

的带宽,本文利用磁控溅射方法在介质杆面上沉积得到极薄且均匀的金属钛薄膜,薄膜的厚度为 50 纳米,然后再电镀一层约为 5 微米左右的铜薄膜,最后与螺旋线焊接,焊接完毕后利用酸腐蚀掉夹持杆上螺旋线匝与匝之间多余的焊料。

该方法可以较好的提高慢波组件的散热性能。缺点是介电性能降低,高频损耗增加;对于镀膜焊接后的多余膜料不容易去除干净,而且在去除时螺旋线可能会发生化学反应而使性能受到影响。

(6)压力扩散焊接法——我们首次将压力扩散焊接技术用于慢波组件制备,介质杆不用镀金属,也不用加焊料,而是利用高温下加压使螺旋线与介质杆之间产生原子键的结合而完成焊接。由于钼的熔点高,硬度大,不容易实现扩散焊接,因此必须首先在钼螺旋线上镀一层铜,镀膜厚度在 8~10 微米,将具有金属铜薄膜的螺旋线和介质夹持杆及金属管壳固定在装架模具上,利用冷弹压法制成螺旋线行波管慢波组件,最后将组件装入低膨胀系数石墨模具内,在氢气炉内 950 度保温 10 分钟,制成螺旋线行波管慢波组件。

图 2 给出这种焊接结构的慢波组件剖面图。

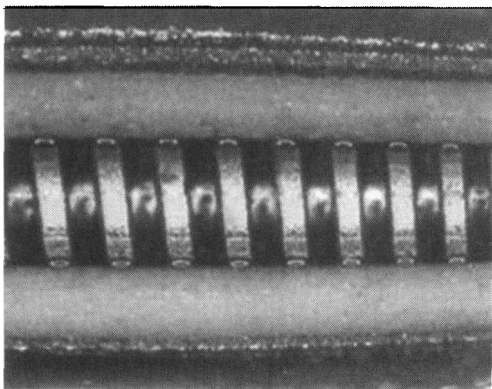


图2 压力扩散焊接的慢波组件剖面图

从图上可看出具有铜薄膜的螺旋线和介质夹持杆焊接点清晰牢固。

3 慢波组件散热性能的实验测试

3.1 慢波组件散热性能的评价方法

在螺旋线慢波系统工作时,螺旋线的温度是否正常是至关重要的。因此,我们研究慢波组件的散热性能主要将重点放在研究螺旋线温度的变化情况上。主要设想如下:

在真空状态下,给螺旋线加入直流电压,使螺旋线得到功率而发热,观察螺旋线温度随加入功率的变化情况。由此来判断螺旋线上的热量向管壳外的传导能力。但是由于螺旋线装配在管壳里面,所以不容易直接测得螺旋线的准确温度。因此首先想到采用间接测量金属管壳的温度来评价散热性能。但是,管壳的热容量

比螺旋线大很多,螺旋线上温度的变化反映到管壳上时已经十分微小了,这就极大的增加了测量误差。还是直接测量螺旋线温度来测评比较准确。对于螺旋线温度的测量可以采用许多方法,像常用的热电偶测温 and 辐射测温等方法。但是,用热电偶测慢波组件温度时,热电偶的安装十分困难;若利用辐射测温法,不容易测到螺旋线的温度,还可能要损坏管壳。我们提出电阻法测量螺旋线温度。此方法可直接推导得出温度,避免了由于间接测温所带来的误差,还解决了螺旋线的温度不容易测量的问题。

首先测出钼的电阻随温度的变化关系式。其原理如下:

在高温炉中对钼螺旋线进行加热,在加热过程中提供氮气保护,以防止由于微弱的氧化而造成测量误差。测量得到钼的电阻随温度的变化如图 3 所示。

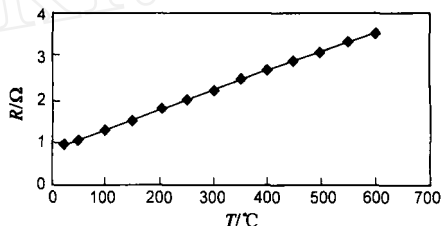


图3 钼的电阻随温度的变化

由上图可以看出钼的电阻随温度变化遵循高度的线性,即:

$$R = R_0(1 + A\Delta T) \quad (1)$$

其中 A 为钼的电阻温度系数,在 $0^\circ \sim 600^\circ$ 范围内 A 近似为 $0.005/^\circ\text{C}$ 。得到了钼的温度系数,即可以在测量出电阻值的情况下,根据公式(1)即可推算出钼螺旋线的温度值。

具体测试方法如下:

在真空条件下,对慢波结构的螺旋线两端加直流电压,给螺旋线提供逐渐增加的功率,使螺旋线温度上升;记录在温度变化过程中螺旋线两端的电压与螺旋线的电流,由此可得到在不同温度时螺旋线的电阻和功率,进而推算出螺旋线此时的温度,这样就可以求出螺旋线温度随加入功率的变化情况。试验装置如图 4 所示。

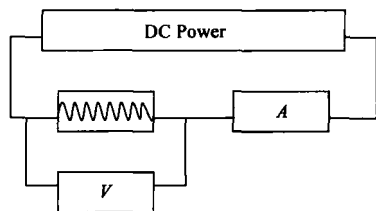


图4 慢波组件散热性能测试原理图

图 4 实验电路采用电流表外接法,是因为螺旋线的电阻很小,一般在 $0.5\Omega - 0.8\Omega$,这个电阻比电压表内阻

小很多,这样连接可以减小实验误差.对螺旋线两端提供直流电压,是为了避免螺旋线电感的影响.在真空状态下测试是为了避免螺旋线氧化和减小空气对组件散热性能的影响.

3.2 慢波组件散热性能的实验测试

利用电阻温度系数法对不同方法制备的慢波组件散热性能进行了测试,结果如图 5 所示.

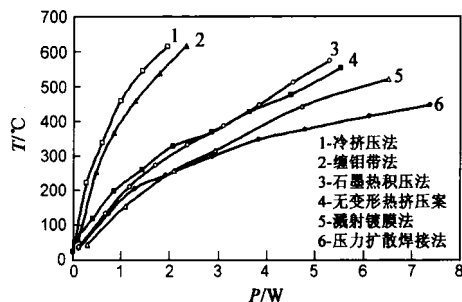


图5 不同方法制备的慢波组件螺旋线温度随加入功率的变化

表 1 给出不同方法制备的慢波组件螺旋线温度为 300℃ 和 400℃ 时,螺旋线的加入功率.

表 1 螺旋线加入功率与温度的关系

Helix temperature (°C)	DC power (W)					
	Cold compress Method	Mo wrapping method	Graphite wrapping method	Hot insertion method	Magnetron sputtering plating method	Pressure diffuse welding method
300	0.50	0.62	1.79	1.78	2.70	2.92
400	0.79	0.99	3.31	3.30	4.41	5.61

从图 5 和表 1 中可看出冷挤压法制备的慢波组件散热效果最差,压力扩散焊接法制备的慢波组件散热效果最好.冷挤压法制备的慢波组件经过缠铝带后,其慢波组件散热性能有了一定的提高,提高了约 20%.冷挤压法制备的慢波组件经过石墨模具热挤压后,其慢波组件散热性能有了非常大的提高,提高了约 3 倍.在 300℃ 时,无变形热挤压法制备的组件是冷弹压法制备的组件散热能力的 3 倍以上,400℃ 时是 4 倍以上,达到了石墨热挤压法制备的慢波组件散热性能.由于石墨热挤压方法制备的慢波组件经过两次机械力的作用,且石墨的模具远达不到悬压管壳的精度.因此经过石墨挤压后慢波组件的管壳变形比较大,从图 6 可以反应出这种变形.

从图 6(a)可看出石墨热挤压法制备的组件驻波系数随着频率的变化呈现出较大的不规则抖动,而无变形热挤压法制备的组件呈现出比较小的抖动,从图 6(b)可看出石墨热挤压法制备的组件在不同位置具有不同强度的反射,而无变形热挤压法制备的组件的反射强度明显减弱.图 6(a)频域驻波系数抖动正是由于慢波组件内部杂乱无章的反射造成的,这种反射在电

子注与电磁场相互作用时,会被放大百倍^[11],从而影响行波管的性能.

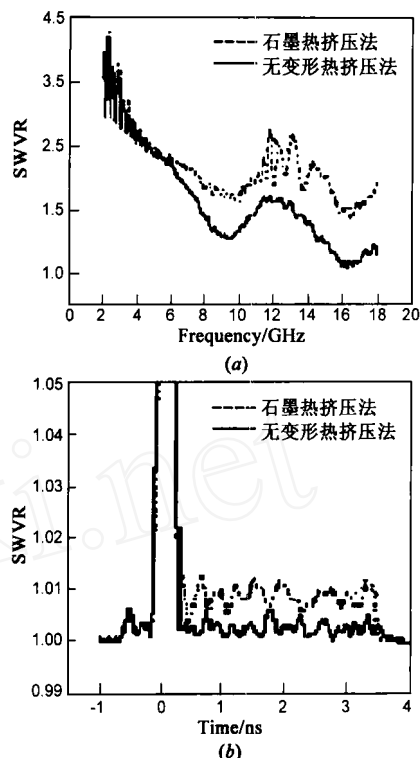


图6 采用石墨热挤压法和无变形热挤压方法制作的慢波组件的(a)频域;(b)时域驻波系数测量曲线

从图 5 和表 1 中还可看出溅射镀膜法和压力扩散焊接法制备的慢波组件散热性能是传统冷弹压法制备的慢波组件散热性能的 5~6 倍.虽然溅射镀膜法和压力扩散焊接法制备的慢波组件散热性能相差不多,但溅射镀膜法会由于介质杆上存在焊料而使慢波组件的高频损耗增加;镀膜焊接后的多余膜料也不容易去除干净,而且在去除时螺旋线可能会发生化学反应而使性能受到影响,而压力扩散焊接法制备的慢波组件则无上述缺点,因此压力扩散焊接法与溅射镀膜法相比具有非常大的优势.

4 结论

利用电阻温度变化方法测量慢波组件螺旋线温度,进而评价慢波组件的散热性能.利用这一评价方法对不同制备工艺制成的慢波组件散热能力进行了测试,结果表明无变形热挤压法制备的慢波组件的散热能力是冷弹压法的 3~4 倍.传统的缠铝带热挤压法其散热能力远未达到无变形热挤压法制备的慢波组件散热能力.传统的石墨挤压法制备组件的散热性能可与无变形热挤压相比拟,但这种热挤压法由于冷挤和石墨模具的加工原因而引起慢波组件的两次变形,从而造成微波反射点增多.溅射镀膜法和压力扩散焊接法制备的慢波组件散热性能是传统冷弹压法制备的慢波

组件散热性能的 5~6 倍。但溅射镀膜法会由于介质杆上存在焊料而使慢波组件的高频损耗增加;对于镀膜焊接后的多余膜料也不容易去除干净,而且在去除时螺旋线可能会发生化学反应而使性能受到影响,而压力扩散焊接法制备的慢波组件则无上述缺点,因此压力扩散焊接法与溅射镀膜法相比具有非常大的优势。

参考文献:

- [1] Baofu Jia, Chan-Wook Baik, Gun-Sik Park. The design of the input and output transformer for wide-band helix TWT [A]. Proceedings of International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT) [C]. IEEE Press, 2000, 9:715 - 719.
- [2] Ybkio Hiramatsu. Study of block-supported helix circuits for high power TWTs [A]. International of Electron Devices Meeting [C]. IEEE Press, 1979, 25:416 - 417.
- [3] H S Kim. Numerical analysis of the influence of the outer conducting wall in Helix-TWT [A]. Proceedings of the 29th IEEE International Conference on Plasma Science (ICOPS) [C]. IEEE Press, 2002, 5:189 - 192.
- [4] Hyoung S Kim, Han S Uhm, et al. Thermal and structural analysis on the output coupler of a vacuum tube [J]. Journal of the Korean Physical Society, 2004, 44(5):1054 - 1057.
- [5] Roberto Crivello, et al. Thermal analysis of PPM-focused rod-supported TWT helix structures [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1988, 35(10):1701 - 1720.
- [6] H S Kin, H S Uhm, G S Park. Fabrication-facilities development and hot test of helix traveling wave tube [A]. Proceedings of IEEE International conference on vacuum electronics [C]. IEEE Press, 2003. 74 - 78.
- [7] M Tskahashi, T Yamaguchi, H Hashimoto, et al. Non-brazed helix TWT attained 3kWand 600Wat Ku-band [A]. Proceedings of IEEE International electron devices meeting [C]. IEEE Press, 1986. 167 - 170.
- [8] G Fleury, C/Deville. Average power limits of brazed-helix TWT's [A]. Proceedings of IEEE International electron devices meeting [C]. IEEE Press, 1980, 26:806 - 809.
- [9] 董笑瑜, 周陪章. 真空蒸发镀膜技术在大功率螺旋线行波管上的应用[J]. 真空电子技术, 2005, (4):27 - 29.
Dong Xiao-yu, Zhou Pei-zhang. Application of vacuum evaporation film technology in high power helix TWT [J]. Vacuum Electronics, 2005, (4):27 - 29. (in Chinese)
- [10] V Kumar, A Vohra, V Srivastava. Experimental evaluation of lossy coatings of different materials on helix support rods for a high-efficient TWT [A]. Proceedings of International Crimean Conference on Microwave and Telecommunication Technology [C]. IEEE Press, 2004. 648 - 650.
- [11] 王自成, 王莉, 等. 引起行波管增益幅度相位波动的一种原因[J]. 真空电子技术, 2006, (2):15 - 18.
Wang Zi-cheng, Wang Li. Areason for ripples of gain and phase-shift in traveling wave tube [J]. Vacuum Electronics, 2006, (2):15 - 18. (in Chinese)

作者简介:



刘燕文 男, 副研. 1964 年生于天津. 1992 年毕业于北京大学电子学系, 其后进入中科院电子所, 主要从事行波管的制造工艺及电子发射等方面的研究.

E-mail: lliuyanwen58@sina.com



韩 勇 男, 1981 年生于山东济南. 2004 年毕业于山西大学系, 其后进入中科院电子所, 现为硕博连读生, 主要从事行波管的制造工艺等方面的研究.