

脉冲螺线行波管热状态分析及 ANSYS 模拟

赵兴群, 张国兴, 孙小菡, 丁 东, 谢 锴

(东南大学电子工程系, 江苏南京 210096)

摘 要: 本文对国外上世纪 90 年代的产品, 高输出功率高工作比的脉冲行波管进行热状态的分析, 通过计算全面了解国外行波管的热设计要求及必要的工艺措施, 为国内同类型行波管提高可靠性服务. 文中对国内同类型产品的表面热阻率进行测量, 从初步分析结果指出减小表面热阻率的方向和措施. 使用 ANSYS 软件实际模拟仿真螺线行波管, 得到更为准确、可靠的结果, 并和设计计算基本保持一致.

关键词: 脉冲螺线行波管; 热状态; 温度; 模拟

中图分类号: TN124 **文献标识码:** A **文章编号:** 03722112 (2004) 06102904

The Analysis and ANSYS Simulation for the Thermal Condition of Pulse Helix TWT

ZHAO Xingqun, ZHANG Guoxing, SUN Xiaohan

(Department of Electronic Engineering, Southeast University, Nanjing, Jiangsu 210096, China)

Abstract: The analysis and simulation for the thermal condition of pulse helix TWT against a foreign product are given. Through its process, the requirements for the thermal design could be understood quite well and the necessary technology measurement could be taken by the manufacturing engineers. It also leads to improve the reliability for the same kind of TWT. The surface thermal resistivity is measured, and the primary analysis shows how to reduce the surface thermal resistivity by various methods. With the help of ANSYS, the thermal condition of pulse helix TWT has been simulated, its results consistent with the design calculation in the main area are more accurate and reliable.

Key words: pulse helix TWT; thermal condition; temperature; simulation

1 脉冲螺线行波管相互作用区热状态的分析

现在国内的螺线行波管迫切需要提高脉冲输出功率与工作比. 外国的典型产品有输出功率 8KW, 工作比为 5% 的螺线行波管, 其平均功率达 400W, 这要求对螺旋线行波管进行有效的热设计.

本文在总结螺旋线热分析^[1]基础上, 对国外行波管输出螺线段热状态进行全面的计算, 从而明白提高脉冲工作比的关键管子参数.

螺线慢波结构的热分析仅取径向一维考虑. 当螺线上截获电子注和最后几圈的高频损耗, 形成螺线内部的热功率流时, 螺线上出现图 1 所示的三个热亮点 A. 热功率分成六部分, 如图 1 表明的那样, 经由管壳、磁聚焦系统、再由外壳流向底板, 完成散热通道, 导致热传导式冷却. 参照文献[1]的热阻方法推导, 从螺线亮点 A 到极靴边缘 B 点, 即最差的传热途径, 其总温差 $\$T_1$ 是由分段温差之和组成的, 即

$$\$T_1 = \sum_{n=1}^6 \$T_n \quad (1)$$

其中螺线段温差为:

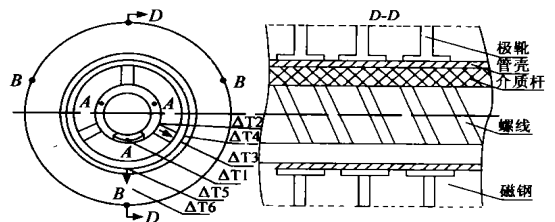


图 1 螺线装配体各段温升 $\$T_n$ 与热功率流方向

$$\$T_1 = \frac{P^2 a}{4N^2 c g k_1} w_t \quad (2)$$

式中 p 为螺距, $a = 2r_c$, a 为螺线平均直径, r_c 是平均半径, N 为介质杆数. 螺旋带宽 g , 带厚 c , k_1 是螺线材料热导率, w_t 是螺线单位长度电子注截获和高频损耗形成的总功率热流,

螺线与介质杆接触面的温差:

$$\$T_2 = Q \frac{p}{N g b} w_t \quad (3)$$

Q 是表面热阻率, 由试验决定. 意大利科学家^[2]给出的 $Q = 0.1088 \text{ in}^2 / \text{W} = 0.568 \text{ cm}^2 / \text{W}$ 是一个比较实际的弹性压

缩螺线装配体常采用的数据. b 是矩形介质杆宽度.

介质杆本身热传导引起两端温差

$$\$ T_3 = \frac{2hp}{b(g+b)k_3N}W_t \quad (4)$$

k_3 是介质杆材料热导率, h 为介质杆放在螺线与管壳之间的高度.

介质杆与管壳接触面两边形成的温差:

$$\$ T_4 = Q \frac{1}{Nb}W_t \quad (5)$$

式(5)中假设介质杆与管壳的表面热阻率和介质杆与螺线间的值相同.

$\$ T_5$ 是热流从夹持杆和管壳接触面沿径向传递, 形成的管壳内外温差, 它可近似地表达为:

$$\$ T_5 = \frac{W_t}{Nk_5} \ln \frac{2PR_0}{Nb} \quad (6)$$

式中 k_5 是管壳材料热导率, R_0 是管壳外半径, 是管壳内半径和管壳厚度之和.

对于磁聚焦系统, 目前主要采用复合管壳, 极靴与管壳焊接成一体, 这里的接触面温差可以忽略不计. 忽略磁钢部分的并联热阻, 并不考虑耳朵部分的影响, 仅计算极靴部分的最差传热路径, 其温差

$$\$ T_6 = \frac{WL}{4Pk_6t} \ln \frac{R_2}{R_1} \quad (7)$$

式中 k_6 是极靴材料热导率, L 为聚焦系统周期, t 是极靴厚度, R_2 为极靴外半径, R_1 为极靴内半径.

我们把单位长度的截获电子注的热功率为 W_1 , 高频损耗热功率为 W_2 , 则

$$W_t = W_1 + W_2 \quad (8)$$

设 V_0 螺线工作电压, I_0 是脉冲阴极电流, T 为通过率, l 为输出段螺线长度, D 为工作比, 则

$$W_1 = \frac{V_0 I_0 (1-T) D}{l} \quad (9)$$

而文献[1]中已经推导出高频损耗的单位长度热功率流

$$W_2 = m p_{out} (10^{d_0/(10m)} - 1) D \quad (10)$$

式中 $m = 1/p$ 是单位长度的螺线圈数, p_{out} 是脉冲输出功率值, d_0 是由实测或程序计算得的单位长度损耗值.

由上面的公式, 对国外管数据进行如下计算.

行波管 $V_0 = 111.2kV$, $I_0 = 11.55A$, 最差的 $T = 90\%$, 工作比 $D = 6\%$, 第三段输出螺线总长 $l = 81.5cm$, $W_1 = 121.4W/cm$. 行波管工作在 $18GHz$, 由计算得 $d_0 = 0.176dB/cm$, 即铜螺旋带损耗, $p = 11.24mm$, $m = 8$, 取 $p_{out} = 3kW$, $W_2 = 71.313W/cm$; 则 $W_t = 191.713w/cm$.

螺旋带是铜材料, $k_1 = 3198w/cm \cdot e$, $r_c = 0.196mm$, $N = 3$, $c = 0.116mm$, $g = 0.173mm$, 得到 $\$ T_1 = 11.404W_t$.

美国雷声公司^[3]对弹压式螺线装配件, 焊接式螺线装配件的表面热阻进行实验过, 并综合在表1的一个范围.

国外管用宽 $0.17mm$, 高 $0.19mm$, 长 $0.173mm$ 的长方体氧化铍瓷块, 采用焊接方式, 与螺旋带宽度 $0.173mm$ 一个长方体焊接, 并与管壳内壁涂铜层焊接. 我们采取表1的一般金属氧化

铍瓷的 $Q = 0.1056e \text{ cm}^2/W$ 是表面热阻率, 所以 $\$ T_2 = 0.1452W_t$. 这表明焊接两边的温差仅为 $8.91e$.

表 1 实验测定的表面热阻率

螺线装配体 工艺方法	螺线慢波结构使用材料	表面热阻范围 $e \text{ cm}^2/W$
弹压式装配	氧化铍瓷与镀铜钨带	0.016~ 0.068
	氮化硼瓷与镀铜钨带	0.040~ 0.077
焊接式装配	宝石杆与镀铜钨带	0.0089~ 0.016
	镀铜层与一般金属氧化铍瓷	0.027~ 0.056
	镀铜层与溅射及属氧化铍瓷	0.005~ 0.010

在计算 $\$ T_3$ 时, 氧化铍瓷的 $k_3 = 21952W/cm \cdot e$, $b = 0.17mm$, $g + b = 1.143mm$, $h = 0.19mm$, $\$ T_3 = 0.1252W_t$.

同理, 得 $\$ T_4 = 0.267W_t$.

在计算管壳温差 $\$ T_5$ 时, $R_0 = 3.12mm$, 管壳是铜镍合金的复合管壳, 取 $k_5 = 0.1174W/cm \cdot e$, $\$ T_5 = 4.1328W_t$.

在式(7)中, $L = 7mm$, $t = 1mm$, $k_6 = 0.1838W/cm \cdot e$ (纯铁), $R_2 = 6mm$, $R_1 = 3.12mm$. 所以 $\$ T_6 = 0.417W_t$.

$$\$ Tt = \sum_{n=1}^6 \$ T_n = 71.120W_t$$

取 $W_t = 191.713$, $\$ T_t = 1401.36e$.

按照文献[4]的模拟结果, 螺线上亮热点到管底板的最差传热途径有 $280e$ 温差, 这并不对螺线造成坏的影响. 底板最高允许温度 $80e \sim 100e$, 这样的亮热点安全温度是 $360e \sim 380e$.

亦有在文献[3]上给出, 螺线最高温度是 $400e$, 即螺线亮热点温度在 $400 \sim 450e$ 左右. 从计算看出, 这样的热设计是安全的.

以上计算, 我们可得出如下结论.

(1) 工作比 D 对螺线升温有很大的影响, 当工作比从 6% 提高到 10% 时, W_t 从 $191.713W/cm$ 上升到 $321.855W/cm$, 螺线总温升高达 $2331.93e$. 当电子注截获瞬时增加, 或集中打在螺线的某几圈时, 有烧毁螺线的风险.

(2) 通过率 T 从 0.19 上升到 0.195 , W_t 下降约一倍, 螺线温升可下降约 30% .

(3) 选择输出段螺线是铜材料, 或是钨带镀铜, 不仅可以降低单位长度螺线损耗, 而且可增加导热率. 这一点对工作在 Ku 波段, Ka 波段的螺线性波管特别有效. 例如输出段螺线不是铜材料而是钨材料, d_0 由 $0.176dB/cm$ 上升到 $0.215dB/cm$, 导热率从 $3198W/cm^2 \cdot e$ 改变到 $1182W/cm^2 \cdot e$, 对应的 W_2 从 71.313 上升到 81.94 , 螺线段温升上涨 11.5 倍左右.

(4) 表1的焊接式与弹压式装配螺线, 其表面热阻率值差别不是非常大. 如果取意大利学者^[3]的 $0.1568cm^2 \cdot e/W$, 则差别很大. 弹压式的二处表面接触温差几乎占整个温差的 50% . 改进弹压式装配工艺是十分重要的步骤. 例如国外管用弹压式装配, 螺线温升将达 $3761.8e$, 有烧毁的危险.

2 表面热阻率的实验测定

对于上述 $\$ T_n$ 的计算公式, 我们通过国外的实例分析以

及 Ansys 软件的模拟, 证实了 T_1 、 T_3 、 T_5 、 T_6 是比较精确的, 而在 T_2 、 T_4 的计算参照了国外实验数据表 1。

我们在 772 厂设计所同志的帮助下做了表面热阻的实验。

实验原理示于图 2 上。夹持杆使用氧化铍, 螺线外未镀铜, 采用管壳弹压式装配。分别在螺线亮点 A 与管壳最低温度点 B 点焊上热偶材料铂铑细丝, 并把它们连接到双掷开关。

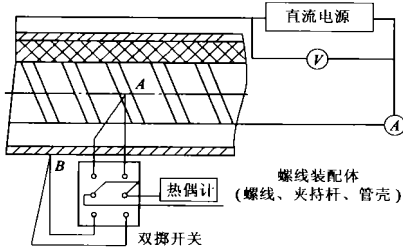


图 2 表面热阻实验原理图

我们用单只热偶计测量总温差 T_1 。

W_1 由直流电流供给, 代替电子注截获和高频损耗的热功率流。实验结果示于表 2。

表 (2) 的结果示于图 (3)。根据实验的尺寸, 材料, 由方程 (8) 计算得 $Q_c = 0.1264 \text{ in}^2 \text{ e} / \text{W}$, 而图 (3) 中虚线是 $Q_c = 0.1088 \text{ in}^2 \text{ e} / \text{W}^{[3]}$ 的计算结果。这表明, 我们实验的表面热阻率是国外数据三倍。

表 2 螺线亮点与管壳升温实验结果 (实验螺线长 81.64 cm)

电压 (V)	电流 (A)	W_1 (W/cm)	管壳温度 (e)	螺线温度 (e)	温差 $T(e)$
0.3	2	0.069	60	75	15
1	3	0.347	100	125	25
3.5	4	1.162	240	310	70
4.9	5	2.84	460	580	120

同时, 从表 2 看出, 螺线最高温度在 580 e 时, 螺线无损坏的迹象。本实验的管壳未加有磁聚焦系统与底板散热系统, 故仅仅测定温差, 并由此计算表面热阻率。实验中的矩形介质杆在与螺线面、管壳面接触处, 没有加工成贴合得很好的圆弧形。进一步的实验将考虑此因素。以上的计算不考虑热导率 k 的温度变化关系。可以采用迭代方法达到比较精确的结果。

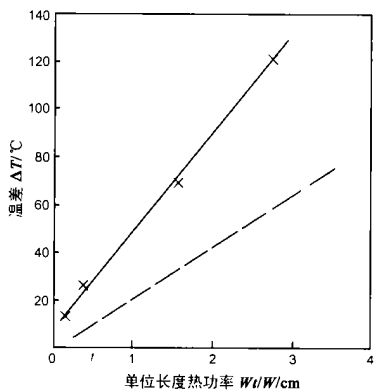


图 3 总温差 T_1 与加热螺线单位长度热功率的关系 (实线: $Q_c = 0.264 \text{ in}^2 \text{ e} / \text{W}$; 虚线: $Q_c = 0.1088 \text{ in}^2 \text{ e} / \text{W}^{[2]}$)

3 ANSYS 软件模拟仿真

ANSYS 是一个大型的有限元分析软件。其热分析可分为三个步骤:

- 1) 前处理: 建模
- 2) 求解: 施加载荷计算
- 3) 后处理: 查看结果

建模: ANSYS 软件提供五类分析单元。对于螺线行波管实例而言, 我们采用三维体积型元素。在建立分析模型时, 采取从里向外的顺序。首先生成螺线: 建立垂直于 XY 平面的螺线管截面, 再生成一条位于圆柱面上的曲线, 该圆柱面是夹持杆内径所在柱面, 用拖拉命令使此前产生的面积绕着这条曲线生成体积, 即螺线。然后生成三根夹持杆, 夹持杆形状为圆弧状。夹持杆的外表面和管壳互相接触。最后建立极靴和磁钢。所使用的参数在前面已有叙述。整体分析模型如图 4 所示, 取一个周期。为了能够显示模型内部部件, 从整体模型中沿圆周取出四分之一管壳、极靴和磁钢。整个模型中包含五个多周期螺线、三根夹持杆、一个完整的极靴及极靴两边的半个周期磁钢。

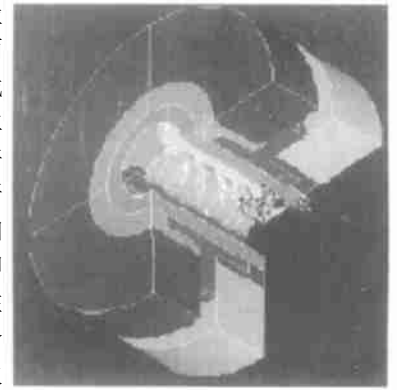


图 4 螺线建模结果

热分析的初始条件可以为: 温度、热流率、热流密度、对流辐射、绝热、生热等。为了能够计算螺线热分布结果, 我们假定了环境温度为常温 (20 e), 在磁钢和极靴的外部存在对流系数 2000 W/me 。截获电子注的热功率 W_1 和高频损耗热功率 W_2 作为热生成, 加载到螺线内表面上。尽管使用自由网格化, 在一台奔 0 电脑上, 整个计算只需要五分钟。

从图 5 上可以发现, 在螺线行波管上, 最高温度亮点的温度为 5111.8 K, 而最低温度点的温度为 3611.9 K, 温差为 1491.9 e。将前面所计算的结果与 ANSYS 仿真结果相比较, 列于表 3 中。从表上可以发现:

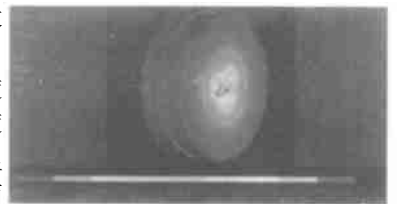


图 5 加载功率为 191.713 W/cm 螺线温度彩云图

表 3 温差比较

类别	温差	T_1 (度)	T_3 (度)	T_5 (度)	T_6 (度)
计算结果		27.6	5.0	85.3	8.6
ANSYS 结果		29.1	17.9	87.8	15.1

(1) 两种方法在螺线的温度差 T_1 上, 误差较小, 说明两种方法的一致性。虽然温度差不大, 但螺线本身温度较高, 其热量只能通过夹持杆向外传导。

(2) 对于夹持杆温差 T_3 , 两种分析方法存在较大的差

别,其原因可能是因为氧化铍瓷的导热率随温度变化较大.根据文献[5]中的数据,可以了解到,对于氧化铍瓷这样的材料,在低温状态下,其传热性能可以和铝合金相媲美,而在比较高温的状态下,其导热系数下降很快.当温度上升到 100e 时,导热率下降一倍,因此,夹持杆上的温差也就加大.此外,为了方便夹持杆建模,夹持杆形状采用的是扇形,可能会引起少量温差变大.

(3)整个螺线上温差最大处位于管壳上.要降低管壳温差,必须减小热阻,这样热流可以容易地散去.如果以不同的热生成参数分别计算它们产生的温度变化,我们可以得到在不同温差结果.所得结果列于表 4.图 6 为不同的热生成率参数下的温度变化曲线.从上可以看出:

表 4 不同加载功率下温度值

加载功率/W/cm	5.0	10.0	15.0	20.0	25.0
最高温度/K	348.4	403.8	459.4	515.0	570.7
最低温度/K	310.5	327.9	345.5	362.9	380.3
温差/度	37.9	75.9	114.9	152.1	190.4

(1)温度升高与热量生成基本保持线性关系,通过曲线拟合,可以得到 $\Delta T_t U 7161 W_t$.

(2)本计算过程中的结果和数值解基本相吻合,但和实际测量温度间相差热阻温差,这是因为,热在接触表面间传递过程中存在热阻,它和许多因素有关,如材料、接触面大小、表面光洁度、接触压力、表面清洁度等.热阻产生的温差在某些条件下会是一个较大的数值.同时在仿真时,各项参数随温度变化的规律有待进一步研究.

(3)随着热生成率的加大,不仅螺线行波管上的温差变大,而且螺线外表面的最低温度也将快速上升.因此降低管外散热,将会大大降低螺线管的整体温度,提高其工作可靠性.

(4)所得出的结果均是在接触良好状态下得到.如果螺线和夹持杆出现接触不良,则螺线温度急剧上升.仿真计算表明,此时的螺线温度足以烧毁螺线.

由于 ANSYS 是一个非常庞大的软件分析包,它的分析对象、分析类型、分析参数繁多而且极其复杂,因此它对使用者要求极高,不仅要了解分析对象,而且要了

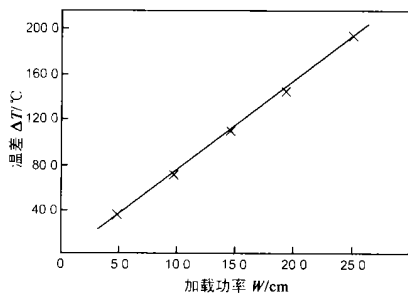


图 6 加载功率和螺线温度关系

解分析 ANSYS 的内部操作命令.为了能给行波管设计人员方便地使用 ANSYS 软件进行热分析,我们在 WINDOWS 平台上使用 VC++ 设计专用的分析程序.使用者只需选择相应的行波管类型,输入相应的参数,就可以方便地形成 ANSYS 所能够识别的命令,在 ANSYS 软件包中进行相关的分析.我们设计了可以进行参数输入的用户界面,可以录入行波管的几何尺寸、材料参数、分析条件、计算方法等.

4 结论

本论文总结了国外脉冲螺线行波管热状态的分析;完成了螺线慢波结构装配体表面热阻率的实验测量;用 ANSYS 软件首次对实用螺线行波管稳定热状态进行了模拟,和热阻方法向比较,结果更接近实际测量值.研究结果表明使用这样的模拟分析和设计计算可以全面地了解螺线行波管的工作时热状态,主要部件上的温度分布,温差数值等.它对螺线行波管的设计和螺线行波管运行可靠性有一定的指导意义.

致谢 感谢南京电子管厂包正强、邓衡、周培章、朱莹、郑锦标等同志在螺线行波管温度实验中和 ANSYS 软件使用方面的帮助.感谢东南大学生物医学工程系白振华硕士在本项目研究中的工作.对电子元器件可靠性物理及应用技术国家试验室的经费支持表示衷心感谢.

参考文献:

- [1] 张国兴,邓衡,包正强,胥辉.螺旋线行波管结构的传输特性和热分析[R].中国:中国国防科学技术报告,2002.10.
- [2] R Crivello, R W Grow. Thermal analysis of PPM focused rod supported TWT helix structures[J]. IEEE ED 1988, 35(10): 1701-1720.
- [3] R Harper, M P Puri. Heat transfer and power capabilities of EHF helix TWTs[J]. IEDM 1986: 498-500.
- [4] B Braatz, G Dohler, G Groshart. 100W 18~40GHz Traveling Wave Tube[J]. IEDM 1987: 466-469.
- [5] 机械工程手册编委会.机械工程手册)))工程材料[M].北京:机械工业出版社,1982.

作者简介:



赵兴群 男,1964 年生于江苏省泰州市,1984 年毕业于南京工学院无线电系,1986~1987 赴瑞士学习,获硕士学位,现为东南大学副教授,主要研究方向超声波检测技术、电子可靠性技术等.



张国兴 男,1939 年生于江苏省无锡市,1961 年毕业于南京工学院无线电系,后留校任教,现为东南大学教授,国防重点实验室学术委员会委员,国营 772 厂和 776 厂技术顾问,主要研究方向微波和毫米波 CAD、行波管可靠性技术等.

孙小蕊 女,1955 年生于安徽省,1978 年毕业于南京工学院电子工程系;1982 年 1 月毕业于南京工学院物理电子器件与技术专业,获硕士学位,后留校任教,现为东南大学教授、博士生导师,主要研究方向光通信理论和技术及电子元器件可靠性技术等.