

# 开敞型慢波线热传导的一维分析\*

任 裕 安

(中国科学院电子学研究所)

## 提 要

在“O”型功率行波管中,慢波线的散热性能决定了行波管的功率容量。本文根据热力学的一维温差方程,导出了由梯形横截面介质杆支撑的开敞型慢波线的热点与管壳之间的温差,此温差值决定了管子的功率容量。用求得的分析式对具体结构进行计算,求得的计算值与实测值相符。文中还给出了几个弹压型及焊接型慢波线的温差数据作为分析比较,为慢波线的工艺设计分析提供了依据。

## 一、前 言

在“O”型功率行波管中,慢波线上既有电磁波传播,也有高密度电子注穿越其作用区,因而慢波线上既有高频损耗产生的热,同时也因聚束不完善而使部分电子流打到慢波线上而产生的电子轰击热。而这些热必需散逸到管壳外。在实际工作中,行波管慢波线上热损的产生与热的散逸(或传导)是同时进行的,当这两个方面互相平衡时,则慢波线就能安全稳定地工作。讨论热损的产生基本上是属于微波电子学的范畴,根据慢波线的微波传播特性,和它的材料的物理性能,可大致估计出慢波线的分布损耗;而另一方面又可根据大信号理论分析求出微波与电子注作用,微波功率沿线路的分布,电子作用效率,这样就可以确定传输最大功率的线路段,以及由此而产生的热损值,另一面,由于电子注与微波作用之后,速度变得零散了,因而就有散聚现象,这种散聚的程度因聚焦方式而异,在恒磁聚焦系统中其散聚程度就远比在周期聚焦系统中轻,因此热损的产生与具体的慢波线型式,尺寸以及聚焦方式都有密切关系,目前还未见到有广义的微波电子学的分析能普遍用于任意场合,只能按具体结构,作具体分析。对具体慢波线的高频损耗的估计已有不少参考文献,由于篇幅所限,关于产生热损的微波电子学问题,本文不讨论。

慢波线的热散逸(或传导)基本上是一个工艺学问题。用热力学的观点来探讨慢波线的散热问题不单是为了工艺设计需要,同时也是估计慢波线热损产生时所必需。因为线路的分布损耗是温度的函数,而线路的温升又主要取决于线路的散热方式与结构。可见散热的分析是重要的。

行波管慢波线大致分为两大类,一类称为封闭型,另一类称为开敞型。另外还有这两类慢波线路的混合型式,例如用长度为四分之一波长的金属杆支撑环杆线,但由于存在杂

\* 1979年2月1日收到。

模,很少采用。目前国内外的研制机构都集中注意力于改进开敞型慢波线的散热能力,已知的改进方法有三种:(1)内冷式(2)弹压式(3)焊接式。

本文主要讨论焊接式开敞型慢波线的散热问题。利用热力学方法探讨慢波线的热传导问题曾有人论述过,但这些论述均不够全面,文献[1]只有理论分析没有实验证明,而文献[2]只有实验数据没有理论分析,因此利用这些论述作结构设计和分析均有困难。本文为了定量分析、判断慢波线结构的传热性能,比较其优劣,用热力学的观点,寻求一个简易、实用的分析法,借助它得到归一化的数据,以便于对比、分析。这里,着重介绍一种考虑了实验修正的分析法,并用它对现成的实际结构的散热性能进行核算,其结果是计算值与实测值相符,因此可运用该分析法对具体结构进行计算,作为工艺设计的依据,以确定各种热工参数和结构尺寸等。在作分析时,还应注意到功率沿线路连续往前传播,在沿线路轴向的增长率以慢波波长衡量不算太急剧,而在一个慢波波长内慢波线一般都包含着几个节距,每一节距内,微波分布衰减一般都较小,因此可认为在每一节距(即一匝)内,微波的热损是均匀分布的。另外在正常的聚焦情况下,由电子注散聚产生的电子截获轰击热也是均匀分布的,这些假设在管子正常工作时是合理的。要使管子的微波性能良好,慢波线在工艺处理后应该在整个线路上是均匀一致加载的,即每一节距,无论是在小信号区或在饱和输出区都应具有相同的焊接接触情况,因此我们只讨论其中任何一个节距的传热性能即可。在比较各种慢波线路的传热性能时,均以线路上任何一个周期的散热能力作比较。综上所述,进行慢波线路热传导性能测试时,在慢波线上通以直流或 50Hz 交流电加热,即可模拟慢波线的高频损耗和电子轰击加热。

## 二、环杆线(或螺旋线)的热传导性能分析

只用环杆线一个环(或螺旋线的一匝)来研究。假设环杆是由两根(或两根以上)具有梯形截面积的介质杆支撑,如图 1 所示。每一环沿圆周长有均布的热量,通过梯形截面介质传送到管壳。从热力学的观点看,环中的  $A$  及  $B$  点(两根支持杆之间的中点)必为环上的最热点(或称热点)。热量由  $A$  往两端传送到  $C$ , 然后由  $C$  经介质杆传到管壳外。由于结构对  $AB$  面是对称的,所以可以只考虑  $AC$  及  $BC$  的热量传到  $C$  后再经  $D$  传到管壳外。为便于计算,分两个区进行。第一区为介质区,即由  $C$  至  $D$  点之间的传热区;第二区为金属区,即由  $A$  至  $C$  之间的传热区。每一区之间的接点可假设为无附加热阻。各区的热传导或温差的计算可根据简化的热传导方程求得。直观看,  $A$  及  $B$  点有最高的温度。此点温度决定了慢波线的可靠工作温度的上限,即慢波线的功率容量。各区的热传导或温差的计算如下:

第一区(介质区)——设  $K$  为介质的热导率,它是温度的函数,其关系为:

$$K(T) = K_{01}(1 - \beta T) \quad (1)$$

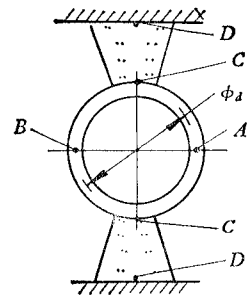


图 1 环杆线及其支撑介质截面图  
Fig. 1 The cross-section diagram of ring-bar helix and its dielectric rods

由热力学的关系,得到一维的温差方程的表示为:(见文献[3])

$$-K(T)dT = \frac{WdL}{A(L)} \tag{2}$$

式中,  $K(T)$  为温度  $T$  下的热导率,  $K_{01}$  为室温下的热导率,  $\beta$  是介质热导率的温度系数(对陶瓷类介质,可取  $\beta \approx 1.6 \times 10^{-3}$ ),  $W$  是单位时间内流过截面的热量,  $dL$  是沿传播方向上的长度增量,  $A(L)$  是介质杆内垂直于热通路的面积,是距离  $L$  的函数.

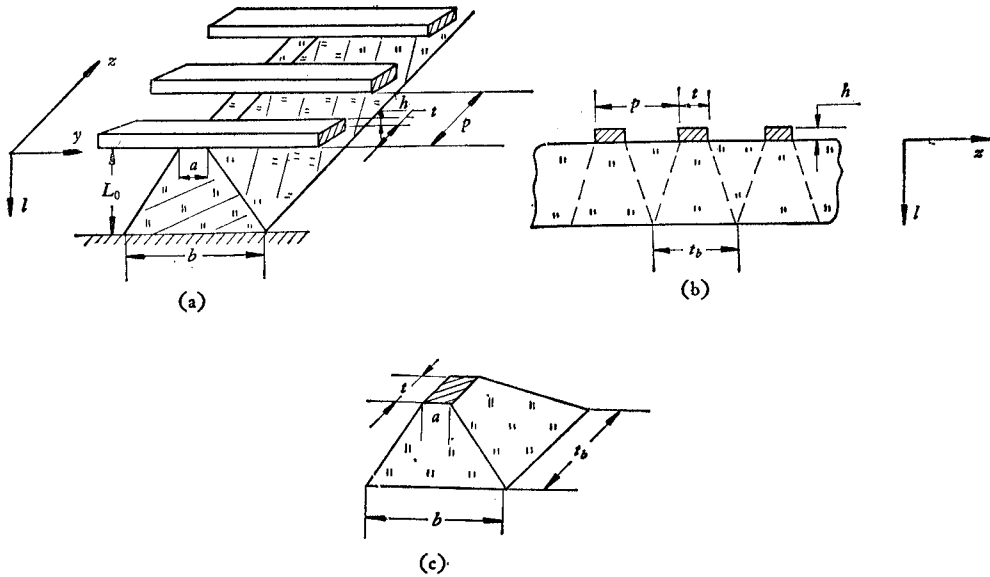


图 2 介质杆的截面尺寸及环杆慢波线的截面尺寸

- (a) 慢波线的结构尺寸 (b) 慢波线的 z 向剖面及尺寸 (c) 计算每一传热面时的双梯形介质尺寸
- Fig. 2 The cross-sectional dimensions of ring-bar helix and its dielectric support rods  
 (a) The structural dimensions of SWS (b) The structural dimensions of SWS in z-direction  
 (c) The dimensions of double trapezoid shaped dielectric support for calculating each heat transfer surface

根据图 2,按双梯形截面,面积与距离  $L$  的函数为:

$$A(L) = \left[ a + (b - a) \frac{L}{L_0} \right] \cdot \left[ t + (t_b - t) \frac{L}{L_0} \right] \tag{3}$$

式中,  $a$  为梯形截面的顶宽,  $b$  为底宽,  $t$  是一个环(或螺线)的宽度,  $t_b$  是对应  $t$  边的台形底宽(一般情况等于节距),  $L_0$  为双梯形截面的高,  $L$  为垂直于顶宽并从顶宽算起的距离.

对(2)式求积分,则左手项为

$$\begin{aligned} \int_{T_2}^{T_1} -K(T)dT &= - \int_{T_2}^{T_1} K_{01}(1 - \beta T)dT = \frac{K_{01}}{2\beta} [(1 - \beta T_1)^2 - (1 - \beta T_2)^2] \\ &= \frac{K_{01}\beta}{2} \left[ \left( \frac{1 - \beta T_1}{\beta} \right)^2 - \left( \frac{1 - \beta T_2}{\beta} \right)^2 \right] \end{aligned} \tag{4}$$

而当  $b \approx a, t \approx t_b$  时,右手项为

$$\int_0^{L_0} \frac{W dL}{A(L)} = \int_0^{L_0} \frac{W dL}{\left[ a + (b-a) \frac{L}{L_0} \right] \cdot \left[ t + (t_b - t) \frac{L}{L_0} \right]} = \frac{W L_0}{at} \cdot \frac{\ln \left( \frac{t_b}{t} \cdot \frac{a}{b} \right)}{\left( \frac{t_b}{t} - \frac{b}{a} \right)} \quad (5)$$

综合(4)及(5)式则有

$$\frac{K_{01}\beta}{2} [x_1^2 - x_2^2] = Q \quad (6)$$

式中,

$$x_1^2 = \left( \frac{1 - \beta T_1}{\beta} \right)^2; \quad x_2 = \left( \frac{1 - \beta T_2}{\beta} \right)^2; \quad Q = \frac{W L_0}{at} \cdot \frac{\ln \left( \frac{t_b}{t} \cdot \frac{a}{b} \right)}{\left( \frac{t_b}{t} - \frac{b}{a} \right)}$$

因  $T_2$  或  $x_2$  是未知项, 则有

$$x_2 = \sqrt{x_1^2 - \frac{2Q}{K_{01}\beta}} \quad (7)$$

因  $\Delta T_1 = T_2 - T_1 = x_1 - x_2$ , 所以有

$$\Delta T_1 = x_1 - \sqrt{x_1^2 - \frac{2}{K_{01}\beta} Q} \quad (8a)$$

在实际结构中, 支杆的截面有可能是矩形的, 则有  $a = b$ ,  $t_b = t$ , 则式(8a)变为

$$\Delta T_1 = x_1 - \sqrt{x_1^2 - \frac{2}{K_{01}\beta} \cdot \frac{W L_0}{at}} \quad (8b)$$

也可以采用圆截面的支杆, 此时仍可采用(8a), 仅需将圆截面等效为梯形截面即可, 这样等效, 在工程分析上是允许的。

第二区(导体区)——由热力学的一维传热方程得到

$$-dT = \frac{w(l)dl}{AK_{02}} \quad (9)$$

式中,  $dT$  是温差,  $w(l)$  是单位时间内流过  $l$  处截面积的热量, 并且是沿导体圆周距离的函数,  $l$  和  $dl$  是垂直于导体截面的距离和距离增量,  $K_{02}$  是环杆(或螺线)金属的热导率,  $A$  是环(螺线匝)的横截面积( $t \cdot h$ )。由于每环(或每匝)的热损是均布的, 所以

$$w(l) = \frac{P_0}{\pi d} l \quad (10)$$

式中,  $P_0$  是每一环(或每匝)的总热损,  $d$  是每一环的直径。对(9)式积分则得

$$T_2 - T_1 = \frac{1}{AK_{02}} \cdot \frac{P_0}{\pi d} \cdot \frac{l_0^2}{2}$$

或

$$\Delta T_2 = \frac{1}{AK_{02}} \cdot \frac{P_0}{\pi d} \cdot \frac{l_0^2}{2} \quad (11)$$

式中,  $l_0$  是由热点  $A$  至  $C$  沿圆周的距离。综合第一区与第二区的温差, 则得热点与管壳之间的温差, 应为

$$\Delta T = \Delta T_1 + \Delta T_2$$

在以上的分析中忽略了接触面间仍有一定的热阻,故上式得出的计算值比实测值低,如考虑到焊接面间的小量热阻,则实测温差可取

$$(\Delta T)_0 = R\Delta T \quad (12a)$$

(12a)式中,  $R$  是修正系数,这个系数是考虑了焊接面的小量热阻值而引入的,  $R$  与焊接质量和焊料成分有关,在实际的焊接结构中取  $R = 1.16$ ,则(12a)式变为

$$(\Delta T)_0 = 1.16\Delta T \quad (12)$$

利用(12)式计算文献[2]的螺线温升,将实测值与计算值均画于图3.可见由(12)式

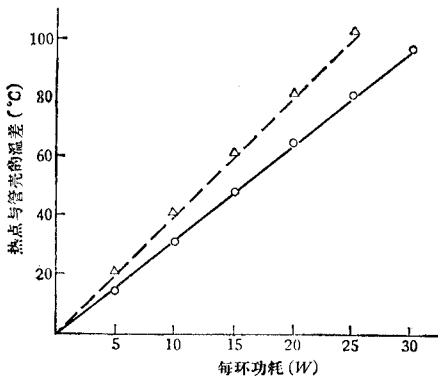


图3 焊接型螺线结构的传热性能(具体结构和参数见文献[2])

— 圆铍瓷支杆(实测值)  
— 楔形铍瓷支杆(实测值)  
○, △ 计算值(按(12a)式计算)

Fig. 3 The heat transfer characteristic of brazed SWS (refer to ref.[2])

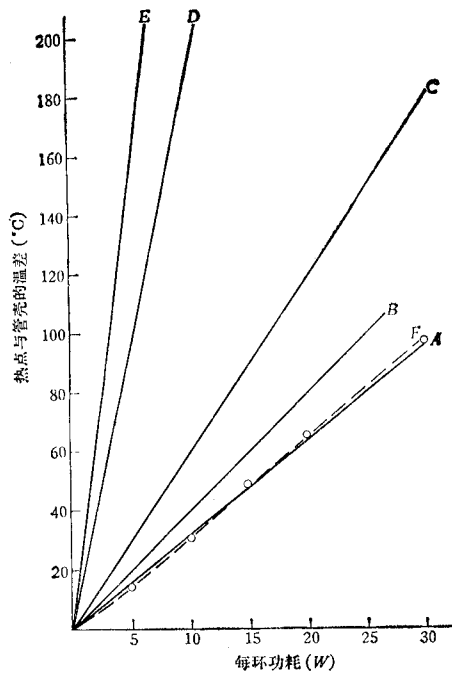


图4 几种慢波线的温差数据(具体尺寸参数见表1)

A——(见文献[2]), B——(见文献[2])  
C——(见文献[6]计算值) D——(见文献[5])  
E——(见文献[4]), F——(自制的 TWT, 1kW CW 计算值)

Fig. 4 The data of temperature difference of different type SWS

求出的计算值与实测数据相符.可以利用(12)式对国外现有的焊接型慢波线的散热特性进行分析计算,这有助于找出这些具体结构的优缺点,也可以根据不同的结构,使用不同的材料,利用(12)式作出分析计算以选出最佳方案,作为工艺结构设计的依据.

将一些相类似的管型的热性能实测数据归一化后绘于图4作为比较,可以看到,在相同的每环(或每匝)的热损耗功率作用下,弹压型结构的热点温差比焊接型高3—5倍,由此可见焊接型结构的优越性.图中也绘出了我们研制的连续波千瓦级环杆行波管慢波线的散热性能的计算值.该管慢波线是采用氧化铍焊接型结构,在5cm波段获得连续波功率1.2kW,电子效率约为15%,图4中曲线所对应的结构参数示于表1中.

表 1 图 4 上曲线对应的慢波线尺寸参数  
Table 1 The dimensional parameters of SWS corresponding to the curves on Fig. 4

图 4 曲线		焊 接 型				弹 压 型	
		A	B	C	F	D	E
波段		X	X	C	C	C	C
慢波线型式		螺线, 3 根楔形铍瓷杆	螺线, 3 根圆形铍瓷杆	环杆, 2 个桥墩	环杆, 4 根圆形铍瓷杆	螺线, 4 根圆形铍瓷杆	螺线, 3 根圆形铍瓷杆
尺寸参数	$d(\text{mm})$	2.80	2.80	5.30	6.0		
	$l_0(\text{mm})$	1.51	1.51	4.16	2.69		
	$t(\text{mm})$	0.80	0.80	1.00	0.70		
	$h(\text{mm})$	0.40	0.40	0.60	0.80		
	$A(\text{mm}^2)$	0.32	0.32	0.60	0.56		
	$K_{02}$	3.84	3.84	3.84	3.84		
	$a(\text{mm})$	0.838	0.80	2.23	1.00		
	$b(\text{mm})$	1.81	1.20	2.23	2.50		
	$K_{01}$	2.50	2.50	2.50	2.50		
	$L_0(\text{mm})$	1.85	1.85	2.35	2.70		
	$t_b(\text{mm})$	1.90	1.90	1.00	1.50		
功率 (kW)		1	1	7	1.20	0.7	1.2
电流 $I_0(\text{A})$		0.65	0.65	1.5	0.8	0.54	0.8
电压 $V_0(\text{kV})$		10	10	25	11	0.84	0.9
聚焦方式		线包	线包	线包	线包	PPM	线包
参考文献		[2]	[2]	[6]	自制的 TWT	[4]	[5]

注: 1.  $K_{01}$  和  $K_{02}$  的单位为  $(\text{W}/\text{cm}^2)/(\text{C}/\text{cm}^2)$ .

2. 曲线 B 的尺寸按文献 [2] 大致估计.

3. 修正系数  $R = 1.16$ .

### 三、结 论

本文从热力学一维方程出发, 导出开敞型慢波线的散热性能的数学分析式. 在推导中, 对双梯形截面的支撑介质作出分析, 矩形截面就是梯形截面的一个特例, 因此本文提出的分析法具有较普遍的意义. 对文献 [1] 的结构进行散热性能计算, 所得的结果与实验值相符. 并利用该分析法对两个具体结构进行计算, 这些计算值可作为工艺设计的主要参考.

### 参 考 文 献

- [1] J. A. Luken, IEEE Trans. on Electron Devices, ED-16(1969). 813.  
[2] G. Fleury, P. Gosset and G. Kantorowicz, MOGA 70, 8th International Conference on Microwaves

- and Optical Generation and Amplification, KLUWER-DEVENTER (The Netherlands), p. 1—11.*
- [ 3 ] W. H. Meadams, *Chemical Engineering Series*, 3rd Edition, 1954.
- [ 4 ] R. J. Espinosa, *Microwaves*, 8(1969), 54.
- [ 5 ] F. Weinzierl and F. Gross, MOGA 70, *8th International Conference on Microwaves and Optical Generation and Amplification. KLUWER-DEVENTER (The Netherlands)*, p. 1—1.
- [ 6 ] M. O. Bryant and F. E. Wary, MOGA 68, *7th International Conference on microwaves and Optical Generation and Amplification, VDE-VERLAG, GMBH*, p. 42. ad i.C

## ONE DIMENSIONAL ANALYSIS OF HEAT CONDUCTION OF THE OPEN-TYPE SLOW WAVE STRUCTURE

Ren Yu-an

(*Institute of Electronics, Academia Sinica*)

In an O type high power travelling wave tube (TWT), its power capacity is determined by the heat conduction characteristic of the slow wave structure (SWS). When the open type SWS is supported by dielectric rods of trapezoid shape in cross section, the one dimensional equation of the temperature difference between the hot spot of the SWS and the barrel of the tube is derived in this article. The value of temperature difference determines the power capacity of the TWT. The equations obtained are then applied to analyze different kinds of practical open type SWS. Theoretical calculation is in good agreement with measurement. Some values of temperature difference for several practical SWS, some of which are made by spring pressed, and some by brazing, are given for comparison and for use in technological design and analysis.