

微波管电子枪真空除气系统设计

王博锋^{1,2}, 胡旭华¹, 周冠丽¹, 李宏宇³, 周健勇¹, 王小霞¹, 张兆传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实验室 北京 101400;

2. 中国科学院大学 北京 100149; 3. 上海卫星装备研究所 上海 200240)

摘 要:在微波管研制过程中,电子枪真空除气过程的主要作用是对阴极进行加热,获得灯丝电流电压与温度的关系曲线、检验电子枪正常工作时灯丝的电流电压,测试电子枪快速启动参数,测量阴极、聚束极热膨胀量和阴极高温时电子枪材料充分预蒸散从而减少电子枪的蒸散物。根据微波管电子枪结构特点和性能要求,设计和开发了极限真空度 2×10^{-7} Pa 且具有温度、膨胀量等性能测试功能的双工位电子枪真空除气系统。除气系统由直联泵作为前级泵、分子泵和离子泵为主泵构成超高真空系统,采用阀门的切换可实现两工位 in 超高真空度下同时工作且互不干扰,有效提升了电子枪的品质,缩短了研制进度。每个工位均配置“分子泵启动允许”、“离子泵启动允许”、“分解电源开允许”及“真空异常”指示灯,防止误操作对电子枪部件或除气系统带来损坏。测试结果表明微波管电子枪真空除气系统的工作原理、结构设计合理,性能优良,适用于不同型号微波管电子枪,在电子枪研制生产过程中发挥了重要的作用。

关 键 词:微波管;电子枪;真空除气系统;超高真空;测量

中图分类号:TH774

文献标识码:A

文章编号:1002-0322(2019)01-0006-05

doi: 10.13385/j.cnki.vacuum.2019.01.02

Design on vacuum degassing system of electron gun for microwave tubes

WANG Bo-feng^{1,2}, HU Xu-hua¹, ZHOU Guan-Li¹, LI Hong-yu³, ZHOU Jian-yong¹, WANG Xiao-xia¹,
ZHANG Zhao-chuan¹

(1. Key Laboratory of High Power Microwave Sources and Technologies, Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100149, China; 3. Shanghai Institute of Spacecraft Equipment, Shanghai 200240, China)

Abstract: In the development process of the microwave tubes, the main purpose of vacuum degassing system for the electron gun is to obtain the data between current/voltage and temperature, to test the quick start parameter, to measure thermal expansion and to minimize the material evapotranspiration and outgassing. According to the relation between structure and property of the electron gun, two operating station vacuum degassing system was designed and developed with the function of temperature, thermal expansion and other measure property. The final system pressure is better than 2×10^{-7} Pa. In the vacuum degassing system, mechanical pump is used as the backing up pump, while the molecular pump and the ion pump are the main pumps. Each operating station can work simultaneously to improve the quality and to save time for increasing the efficiency. Indicator lights are equipped with the system to prevent the potential problems for the electron guns or the vacuum system that is caused by misoperation. A large amount of data obtained from experiments verifies the working principal, structure design and good properties of the system. It is applicable to different types of electron guns for microwave tubes, which has important significance in the small amount production of klystrons.

Key words: microwave tubes; electron gun; vacuum degassing system; ultrahigh vacuum; measuring

微波管是用于产生和放大微波频率范围高频信号的真空电子器件,微波频率从 1GHz~100 GHz。微波管作为微波电子系统发射机的功率放大器,广泛应用于雷达、通信、电视广播、电子对

抗、粒子加速器、等离子体加热装置等领域,是军用和民用微波电子系统的关键电子器件。微波管由电子枪、高频结构、高频输入和输出系统、收集极、聚焦系统等部件组成。

收稿日期:2018-03-23

作者简介:王博锋(1988-),男,河南省周口市人,博士,助理研究员。

通讯作者:张兆传,研究员。

电子枪是微波管的“心脏”,由阴极-热子组件、聚焦极组件、阳极和阳极支撑筒组件、电子枪绝缘段组件、阴极热子引线组件和电子枪底座组件等部分组成,其功能是产生和形成一定形状的电子注^[1]。微波管研制过程中电子枪真空除气保证电子枪具有良好的洁净度,是决定微波管品质最为重要的工序,为长寿命、高质量、具有良好电气性能的大功率和高频率真空电子器件提供保障。然而电子枪的电流-温度曲线、阴极发射性能和导流系数等性能参数只能待形成整管后在热测环节进行验证。若电子枪的电性能指标不合格,则只能对整管进行返工,调整工艺参数重新制备电子枪组件。因此,为了满足电子枪的温度、时间、热膨胀量及其决定的装配尺寸等机械和电气性能要求,需在超高真空下对电子枪进行高温除气,获取灯丝电流与温度的关系,测试电子枪进行快速启动试验参数,测量阴极聚束极热膨胀量,阴极被加热对电子枪材料进行除气,减少电子枪工作时的杂质蒸散和材料放气速率。目前,真空排气系统的研究报告较多,而对微波管电子枪真空除气、电流电压及温度等性能参数测量的装置鲜有报道。因此,本文针对微波管电子枪的研制需求,有效的在微波管总装前检验电子枪的性能,设计了微波管电子枪真空除气系统,从而为研究电子枪的性能检测提供测试系统。

1 系统设计概述

微波管电子枪真空除气系统的空载极限真空度设计要求为 2×10^{-7} Pa, 工作真空度为 5×10^{-6} Pa。综合技术参数要求,由真空系统、电控系统以及台架结构组成的微波管电子枪真空除气系统分为控制柜和主机结构两部分,通过电缆连接,如图1所示。真空系统分为主真空系统和辅助真空系统,主真空系统以直联泵为前级泵,分子泵和离子泵作为主抽泵,阀门选用 CC-200 超高真空插板阀,管道上设有放气阀和真空规;辅助真空系统是由直联泵、电磁阀和金属角阀组成,用于真空系统的预抽。辅助真空系统可对每个工位分别进行预抽真空或放气,实现两个工位独立或同时工作。石英钟罩 $\Phi 200 \times 500$ mm 通过 L 型密封圈与不锈钢工作台面密封,形成真空室。石英钟罩材质采用透明石英玻璃,透过率高,便于温度、膨胀量等参数测试。

控制系统为容置于两工位上的微波管电子

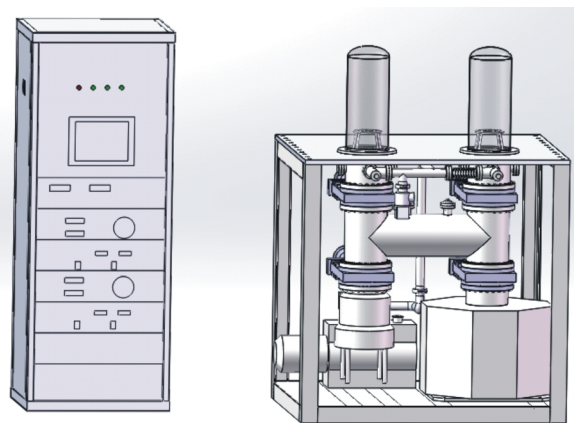


图1 微波管电子枪真空除气系统三维模型图

Fig.1 Three-dimensional model of the vacuum degassing system for microwave electrons

枪提供电流电压及真空系统的操作控制。机械泵,分子泵,真空阀门,离子泵电源,电子枪灯丝电源和真空计均通过控制线路与电气控制系统连接。

根据系统组成和工艺流程分为如下几个阶段:

- (1)低真空抽气阶段,此阶段抽气泵为直联泵;
- (2)高真空抽气阶段,此阶段抽气泵为分子泵;
- (3)超高真空抽气阶段,此阶段抽气泵为离子泵;

真空系统中直联泵迅速将工位从大气 10^5 Pa 抽到 20 Pa 左右,分子泵则主要负责将真空度进一步提高至 10^{-4} Pa,为离子泵的启动提供过渡;离子泵是整个真空抽气系统的主抽泵,具有抽速大、无污染、真空度高 (10^{-4} Pa~ 10^{-7} Pa)、可长时间工作等优点,非常适合超高真空系统的抽气系统。

2 真空系统设计计算

真空系统的设计是根据微波管电子枪的技术指标和性能要求,确定真空系统的基本结构,合理选取真空获得设备、管道、阀门等真空元件来保证系统的性能和可靠性。微波管电子枪真空除气系统要实现超高真空度下电子枪高温除气,并对其进行温度和膨胀量等参数测量的功能。因此,真空系统分为主真空系统和辅助真空系统两部分,其系统原理图如图2所示。

2.1 前级泵抽气时间计算

系统开始抽气时,首先启动直联泵开始抽气,经估算,机械泵的 $\Phi 35$ mm 连接管道长 $2\text{m} > 20D = 0.7\text{m}$,属于长管;直联泵的抽速 14 L/s;当管路内平均压力高于 20 Pa 时,气体流态为粘滞

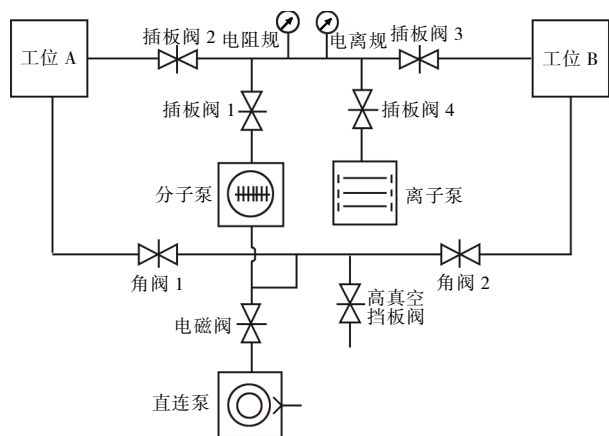


图 2 真空系统原理图

Fig.2 The principle diagram of the vacuum system

流 ($D\bar{P} > 0.67 \text{ Pa} \cdot \text{m}$)。

管道流导为：

$$U = 1.34 \times 10^3 \times \frac{D^4}{L} \bar{P} \quad (1)$$

当管路内平均压力为 2~20 Pa 时，气体流态为粘滞 - 分子流 ($D\bar{P} < 0.67 \text{ Pa} \cdot \text{m}$)。管道流导为：

$$C = Cm \times J = 1.21 \times 10^2 \times \frac{D^4}{L} gJ \quad (2)$$

前级泵的有效抽速为：

$$S_e = \frac{S_p U^4}{S_p + U} \quad (3)$$

前级泵的抽气时间为：

$$t = 2.3 \times \frac{V}{S_e} gKglg \frac{P_1}{P_2} \quad (4)$$

式中： U ——管路流导， m^3/s ；

D ——管路直径， m ；

L ——管路长度， m ；

P ——管路内平均压力， Pa ；

S_e ——泵的有效抽速， m^3/s ；

S_p ——泵的名义抽速， m^3/s ；

t ——抽气时间， s ；

V ——容器体积， m^3 ；

J ——关于 $D\bar{P}$ 的函数，取为 1.27；

K ——修正系数（在不同压力阶段分别取 1, 1.25, 1.5, 2 和 4）；

P_1, P_2 ——开始抽气时容器压力和经过时间 t 后的容器压力。

考虑到由 10^5 ~2 Pa 范围内管路内平均压力差别较大，采用分段算法进行抽气时间计算^[2-4]。根据公式计算得出，机械泵在 1.7 min 内可将单个石英玻璃钟罩抽到 2 Pa。

2.2 真空系统的有效抽速

分子泵作为真空系统的主抽泵，主要用于保持容器的工作真空度。分子泵的抽速为 1200 L/s。

其进气口连接管路通径为 DN200，长度为 380 mm。圆短管流导公式^[4]：

$$U = 116 A \alpha \quad (5)$$

式中： A ——圆截面面积， m^2 ；

α ——克劳辛系数。

由上述公式(2)和(4)可计算出分子泵的有效抽速约为 626 L/s，克劳辛系数 α 取 0.359。同理，抽速 1000 L/s 的离子泵同为真空系统的主抽泵，在不考虑离子泵的选择抽气特性下，其对容器的有效抽速约为 1070 L/s，克劳辛系数 α 取 0.172（管路通径为 DN200，长度为 1000 mm）。在分子泵和离子泵的共同开启的情况下，不考虑其他因素，则真空系统的有效抽速约为 1065 L/s。

2.3 真空系统极限真空度计算

容积 0.024 m^3 的真空室所能达到的极限真空度计算公式如下：

$$P_j = P_0 + \frac{Q_0}{S_e} \quad (6)$$

式中： P_j ——容积所能达到的极限真空， Pa ；

P_0 ——真空泵的极限真空， Pa ；

Q_0 ——空载时，长期抽气后真空室的气体载荷（包括漏气、材料表面出气等）， $\text{Pa} \cdot \text{L/s}$ 。

真空室的极限真空度远低于真空抽气机组的极限真空度。在泵有效抽速一定的条件下，可以近似认为真空室的极限真空正比于真空室的漏气和出气。离子泵的极限真空度为 $3 \times 10^{-9} \text{ Pa}$ ，暴露于真空条件下的石英钟罩表面积为 $A = 0.251 \text{ m}^2$ 。真空泵抽气过程中材料放气率是动态变化的。参考文献中数据^[5]，石英钟罩抽气 10 h 后的放气率是 $5.2 \times 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{L}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$ 。根据计算，容器内部气体总载荷为 $1.3 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{L/s}$ 。因此，根据公式(6)可计算出微波管电子枪真空除气系统空载时所能达到的极限真空度为 $1.2 \times 10^{-7} \text{ Pa}$ ，优于设计指标。

3 控制系统

微波管电子枪真空除气系统的控制系统包括真空计、分子泵电源、稳压电源、离子泵电源、灯丝电源及触摸屏，其控制原理图如图 3 所示。

将微波管电子枪置于真空除气系统中（见图 2），通过 PLC 控制系统执行真空系统的各项工艺过程，进而对真空除气工艺进行精确控制。自动程控除气过程中以真空度为工艺进程的判断依据。工控机通过串行口与复合真空计连接获取真空度值，并以其中较低真空度值为判断依据^[6]。当

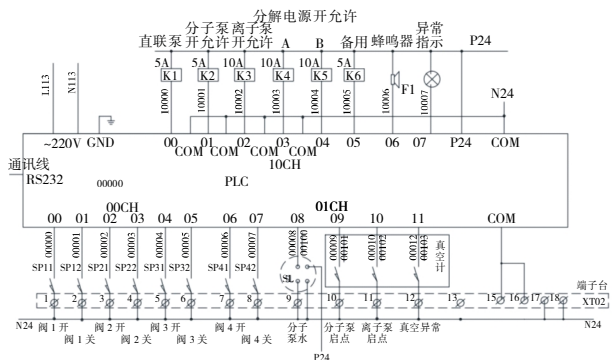


图3 微波管电子枪真空除气系统的控制系统原理图

Fig.3 The control system principle of the vacuum degassing system for microwave electrons

真空度在允许范围内,工控机控制灯丝电源使电流值增大保持电子枪升温;当真空度低于真空度下限时,工控机控制灯丝电源使电流值停止增加,等真空度回升到允许值后电子枪再继续升温。采用稳流电源对灯丝电源进行保护,防止电流电压的波动对电子枪造成的危害。

通过操作触控面板上的开关、电源旋钮及插板阀和放气阀的开启对电子枪组件进行升温、保温使材料充分欲蒸散从而达到真空除气目的;分别运用测温仪和膨胀观察系统获得伏安特性曲线和电子枪膨胀系数;根据数据测试结果调节电子枪总装整管之前的工艺参数以满足设计和工艺技术要求。

4 电子枪性能测试

微波管电子枪真空除气系统的工作原理、结构设计合理,可达到超高真空等技术指标的设计要求;性能优良,适用于不同型号微波管电子枪,在电子枪研制生产过程中进行真空除气、温度、膨胀量和快速启动试验。

图4是三类电子枪温度、真空度与电流之间的关系曲线。由图可见,a类电子枪温度随着灯丝电流值增大而增加,灯丝电流5A增加到7A时阴极温度由855℃升到最高温度1150℃,真空度由 9×10^{-6} Pa降低至 5×10^{-5} Pa;而当工作电流7A持续一段时间后,温度保持恒定值,真空度逐渐升高,表明此时电子枪蒸散物质逐渐减少,放气量变小^[7-9]。b曲线显示电子枪灯丝电流12A逐渐增大到16A过程中,阴极温度由900℃升至1200℃,真空度 2×10^{-5} Pa降低至 3.1×10^{-5} Pa;当维持灯丝电流16A一段时间后,温度区域稳定,真空度逐渐升高。c曲线表明电流23A时阴极达到最高温度1150℃,真空度最低 1.6×10^{-5} Pa;保持工作电流23A恒定,真空度逐渐升高。

图5是电子枪快速热启动曲线。从图中可看出,当快速增加电子枪灯丝电流至工作电流值,阴极在140s时趋向工作温度,达到电子枪及微波管的工作启动条件;在300s时保持温度恒定值850℃,电子枪可正常稳定工作,从而达到快速热启动的目的,也是雷达系统快速启动达到稳定工作状态的先决条件。

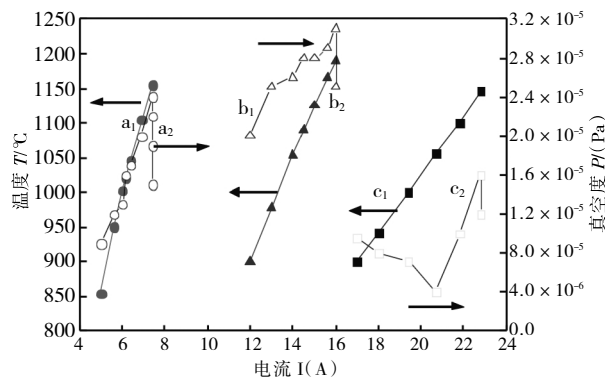


图4 三类电子枪电流、温度与真空度之间的关系曲线

Fig.4 Curves of three kinds of electrons among current, temperature and vacuum

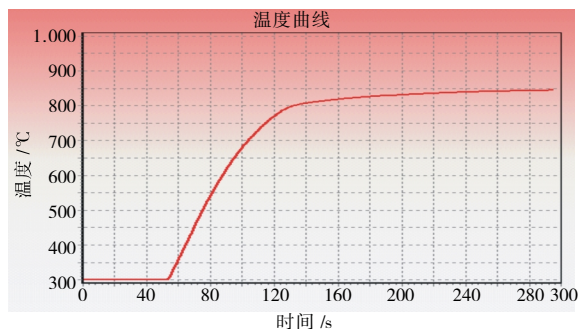


图5 电子枪快速热启动曲线

Fig.5 Quick start curves of electrons

为确保微波管工作时电子枪在热状态下的极间距与设计尺寸一致,必须准确地分别测出阴极与聚束极的热膨胀量,以便获得精确的电子枪装配与焊接尺寸。表1是电子枪热膨胀量测试数据。电子枪A的阴极热膨胀量 Δl_c 是1.12mm,聚束极热膨胀量 Δl_k 是1.39mm。因此,阴极与阳极距离修正量 $\Delta l_{ca} = \Delta l_c = 1.12$ mm,阴极与聚束极距离修正量 $\Delta l_{ck} = \Delta l_c - \Delta l_k = -0.27$ mm。电子枪B的修正量计算同电子枪A。根据热膨胀量修正后,电子枪参量诸如导流系数、电子注通过率等满足设计要求,微波管研制一次成功,性能良好。

表1 电子枪热膨胀量测试数据

Table 1 Experimental datas of electron gun thermal expansion

	Δl_c (mm)	Δl_k (mm)	Δl_{ca} (mm)	Δl_{ck} (mm)
电子枪 A	1.12	1.39	1.12	-0.27
电子枪 B	1.27	1.68	1.27	-0.41

注: Δl_c - 阴极热膨胀量; Δl_k - 聚束极热膨胀量; Δl_{ca} - 阴极与阳极距离修正量; Δl_{ck} - 阴极与聚束极距离修正量

5 结论

基于微波管电子枪真空除气、温度监测、膨胀参数测量和快速启动等性能要求,本文设计了微波管电子枪真空除气系统并在研制任务中投入使用。系统极限真空度优于 $2 \times 10^{-7} \text{Pa}$,结构设计合理,性能优良。双工位真空除气系统可获取电子枪灯丝电流、温度及真空度的关系曲线,有效的对电子枪性能诸如温度、膨胀量和快速启动进行检验,提高电子枪的研制效率;适用于不同型号电子枪,在微波管研制过程中显示出重要的应用价值和意义。

参考文献

- [1] 丁耀根. 大功率速调管的设计制造和应用 [M]. 北京:国防工业出版社,2010.
- [2] 曾群锋,于飞. 真空摩擦磨损试验机的真空系统设计[J],真空科学与技术学报,2013,33(7),627-631.
- [3] 彭光东,陈丽,李宏宇. 光学载荷定标试验设备真空抽气系统设计[J]. 真空,2014,51(4),72-74.
- [4] 米伦,李晓勇,王远,李建. 程控无油超高真空排气台的研制[J]. 真空与低温,2005,11(3),170-174.
- [5] 达道安,等. 真空设计手册[M]. 北京:国防工业出版社,2006:769-789.
- [6] 张以忱,黄化岩,李灿伦. 一种旋片泵抽速曲线数值化方法的探讨[J]. 真空科学与技术学报,2014,24(8),798-801.
- [7] 杨靖鑫,阴生毅,王宇,等. 阴极蒸发物电子发射现象的研究 [J]. 电子与信息学报,2013,33(7),1722-1726.
- [8] 王小霞,廖显恒,张志强,等. S波段大功率速调管快速启动阴极的研究进展 [J]. 中国真空学会2012学术年会论文摘要集,2012,56-78.
- [9] Dwivedi H K, Venkateswarlu D S. Thermal Design Considerations for Fast Warm-up Cathodes in MM Wave Magnetrons [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1996, 43(11), 2011-2018.

太空旅游燃热点 科普教育新突破 ——510所《载人航天与太空旅游》正式出版



2015年5月,由510所李得天研究员等编著的《载人航天与太空旅游》一书由甘肃科学技术出版社正式出版。

《载人航天与太空旅游》全书22万字,作为《科技新生活》科普丛书之一,是510所近年来出版的第一本主要面向青少年的科普图书。本书抓住了太空旅游这一新的、容易引发青少年兴趣的热点,通过讲故事的形式,以图文并茂的表达方式,介绍了飞向太空的“航班”,太空中的“旅馆”,并带领读者“体验”了进入太空要经历的超重、失重等现象,讲述了太空日常生活的“衣食住行”,从而为以青少年为主的广大读者了解载人航天和太空旅游、开启通往神秘太空的“梦想之旅”,提供了通俗易懂的知识通道。

青少年是国家的未来,世界终将由他们主导。但国内面向青少年的航天科普读物却凤毛麟角,极难寻觅。在本书出版前,市场上与航天科普相关的图书,要么是生硬的、报告式的文字描述,要么是知识含量很低的漫画读物,要么是一些外文翻译版的“不知所云”的图书,缺乏一本既能打开青少年心扉,启发他们阅读兴趣,又能同时传播一些基础航天知识的科普图书。

该书在编写过程中,经历了图书选题、资料调研、提纲编写、样稿撰写、文稿编写、编辑校对、图片绘制,及后期图文整理、审读等大量工作,多方协调资源,并得到中国真空学会科学普及和教育委员会、《真空与低温》编辑部等单位的大力支持。

该书一经出版,就已在展会、学校、所内等场合受到读者关注。作为《科技新生活》科普丛书中第一本出版的范本,将于年底进行再版。

(沈阳真空杂志社)