

文章编号: 1001-2486(2009)05-0141-04

强流真空二极管材料放气特性研究*

荀涛, 杨汉武, 张建德, 王勇

(国防科技大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 高功率微波技术的实用化进程要求强流真空二极管缩短抽气准备时间并保持较高的真空度水平。材料出气是高真空状态下二极管腔体内的主要气源, 直接制约着抽气和保真空时间。针对一种陶瓷真空界面、黄铜和硬铝为阴极和阳极外壳的氟橡胶压封二极管, 利用真空设计软件 VacTran 建立了抽气模型, 模拟了管道流导对有效抽速的影响以及真空室主要材料出气率和抽气曲线; 实际比较了常温和烘烤状态下二极管材料的出气特性: 以 60h 作为总的出气时间, 200℃烘烤 8h 的出气量超过了总出气量的 65%; 真空室气压在没有吸气泵作用下维持 10^{-2} Pa 水平的时间相比未烘烤时提高了约 1.5 倍。烘烤对缩短加速器真空系统准备时间、提高器件真空度水平具有明显效果。

关键词: 强流二极管; 陶瓷; 材料放气; 烘烤; 保真空

中图分类号: TL503 文献标识码: A

Investigation of Outgassing Characteristic for a High-current Vacuum Diode

XUN Tao, YANG Han-wu, ZHANG Jian-de, WANG Yong

(College of Opto-electric Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Vacuum diodes are among the most important parts of high electron beam accelerators. In order to make vacuum sealing good, outgassing properties of materials for a ceramic insulated diode is investigated. A pumping model including the influence of flow conductance was set up to simulate the material outgassing rate and pump down time. Finally, the outgassing characteristics of materials between normal temperature and heated state are compared in experiment. Results show that heating can efficiently accelerate the outgassing rate and raise the vacuum sealing time.

Key words: high current diode; ceramic; outgassing; baking; vacuum sealing

高真空技术一直是高功率微波 (HPM) 发展的关键技术之一^[1]。随着强流加速器的实用化进程, 在某些应用条件下, 希望二极管真空系统缩短抽气准备时间, 并具备脱离地面机组而长时间维持真空状态的能力^[2]。目前, 常规微波管的硬管技术和工艺正在被广泛引入高功率微波领域, 包括选择低蒸汽压的结构材料、采用各种降低真空泄露的连接技术, 在安装过程中严格保持部件清洁、抽真空过程采用高温烘烤、应用吸气剂等来保持高真空^[3-5]。典型的应用包括硬管 MILO^[6]和硬管虚阴极振荡器^[7]等。

同其它真空系统一样, 二极管腔室内的气源主要来自系统内原有的空气分子 (体积气体)、由于泄漏而渗入系统的气体、系统中材料的出气、由材料蒸汽压产生的气体以及管道的返流等^[8]。对于妥善安装的真空室, 在高真空度 ($10^{-4} \sim 10^{-1}$ Pa) 下抽气时间主要由材料表面的出气决定。目前实际二极管真空系统仍包含出气率较高的有机材料, 其出气率一般比金属、陶瓷高得多, 并且只能在室温下清洁, 无法高温烘烤, 限制了二极管所能达到的最高真空水平, 关阀后的保真空时间也仅能维持数秒; 另外, 加速器在运行过程中, 需要经常改变高功率微波源的参数, 这通常需要打开真空系统而使其暴露在充满油蒸气的大气中, 从而延长了每次实验的抽真空时间。故此, 在二极管中引入耐烘烤的陶瓷真空界面, 探讨可行、有效的排气方式, 对于缩短强流加速器真空系统准备时间、提高装置真空度具有重要意义。

本文针对一种以氧化铝陶瓷为绝缘体、黄铜和硬铝为阴、阳极的二极管真空腔体^[9], 采用数值模拟

* 收稿日期: 2009-03-28

基金项目: 国家 863 计划资助项目

作者简介: 荀涛 (1982-), 男, 博士生。

和实验手段对材料出气率、抽气曲线及烘烤排气效果进行了研究,结果表明,加热烘烤除气是目前工艺水平下提高强流加速器真空度、延长二极管保真空时间的一种有效方式。

1 抽气系统数值模拟

对于一个给定的真空室,其抽气方程可以表示为

$$Q = p \cdot S_e + V \frac{dp}{dt} \quad (1)$$

式中, Q 为气体载荷($\text{Pa} \cdot \text{L/s}$), V 为真空室容积(L), p 为压强(Pa)。高真空状态下,材料出气是系统主要气源,表面出气率定义为气体从单位表面(几何)面积释出的速率,常用单位有 $\text{Pa} \cdot \text{L/s} \cdot \text{cm}^2$,它是温度 T 与时间 t 的函数,一般有如下形式:

$$q = q_0 \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad \text{和} \quad \lg q = \lg q_1 - \alpha \lg t \quad (2)$$

式中 q 为出气速率; q_0 为气体分子解吸附速率常数; q_1 为材料 1h 出气率; t 为时间; R 为摩尔气体常数, E 为气体在材料表面的吸附活化能; T 为热力学温度; α 为出气速率的衰减系数,对于金属材料, $\alpha \approx 1$,对于有机材料, $\alpha \approx 0.5$,陶瓷介于金属和有机材料之间。在分子流条件下,系统有效抽速可表示为

$$S_e = \frac{S_p C}{S_p + C} (\text{L/s}) \quad (3)$$

式中 S_p 为泵的抽速, C 为管道流导,其值一般取决于管道的几何形状和尺寸,也与管道中气体的种类有关。根据上述理论,利用真空设计软件 VacTran^[10] 建立了二极管抽气模型,如图 1 所示。

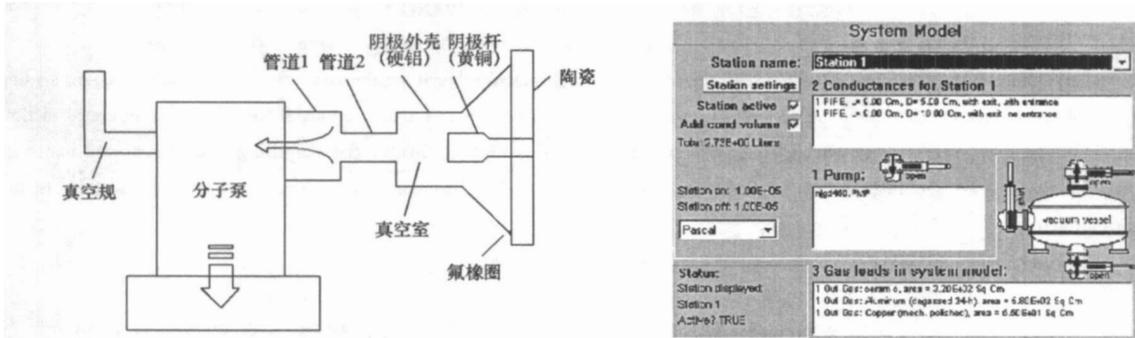


图 1 二极管抽真空模型示意及模拟参数设置

Fig. 1 Schematic of diode pumping model and simulation parameters setup

系统中,主泵为涡轮分子泵,真空室通过两段圆截面直管与分子泵相连,真空室容积 1.7L,包含管道在内的总容积为 2.73L,主要材料为硬铝、黄铜、和陶瓷,表面积分别为 580cm^2 、 55cm^2 和 320cm^2 ;管道 1 和管道 2 的长度 L 均为 9cm,内壁直径 D 分别为 10cm 和 5cm;分子泵最大抽速为 450L/s。

图 2 给出了模拟得到的泵口抽速和有效抽速,可见最小的管道流导限制了系统的有效抽速。在高真空阶段,泵口抽速为 450L/s,系统的有效抽速近似为 64L/s,接近管道的综合流导 68L/s。分子泵并未充分发挥其作用,故此,对于加速器抽真空系统,应尽可能选择短而粗的管道。

图 3 对比了三种材料未烘烤时出气率随时间的变化。可以看出,出气速率是时间的慢变化函数,即时间延长一个数量级,出气速率只降低半个或一个数量级。二极管抽气过程中,陶瓷出气仍占较大比重,其出气率相比金属衰减较慢;黄铜阴极由于表面积较小,其出气基本可以忽略。

当抽速恒定,系统达到稳态后,可将抽气过程中压强随时间的变化关系与材料的平均出气率建立对应关系。在双对数坐标系下抽气曲线也应为直线,直线的斜率反映了该真空室材料平均出气率衰减的快慢。将数值模拟得到真空室抽气曲线同典型实验抽气数据进行比较,二者吻合得较好,如图 4 所示。

实测的抽气曲线相比模拟结果衰减较慢,这与系统的真空处理和抽气历史有关。另外,实验中密封圈的气、油蒸气分子通过管壁的扩散和返流等都可能导导致实验与模拟的偏差。

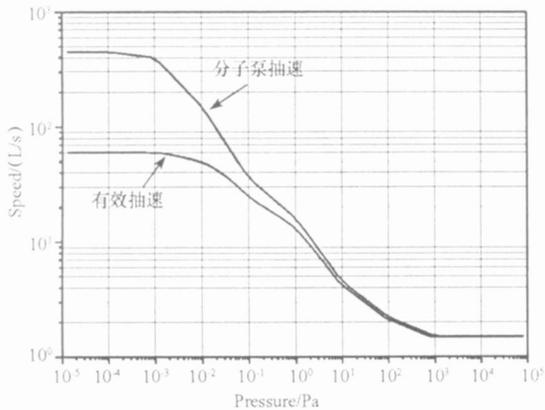


图 2 泵口抽速和有效抽速对比

Fig. 2 Comparison between pumping speed and efficient speed

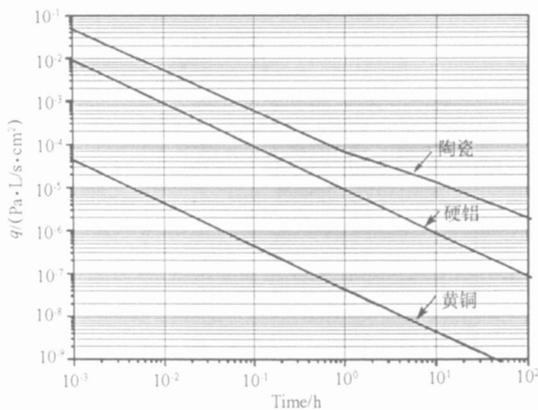


图 3 不同材料出气率随时间的变化

Fig. 3 Outgassing rate variation for different materials in a diode

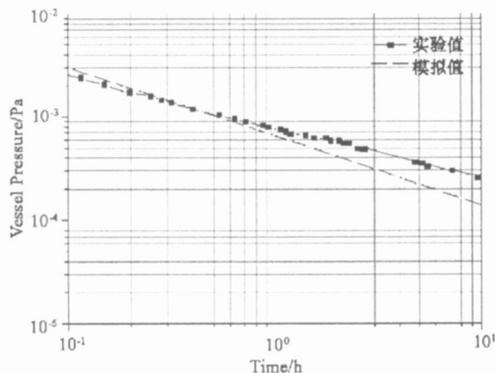


图 4 真空室抽气曲线模拟与实验比较

Fig. 4 Comparison of numerical and experimental result of pump down curve

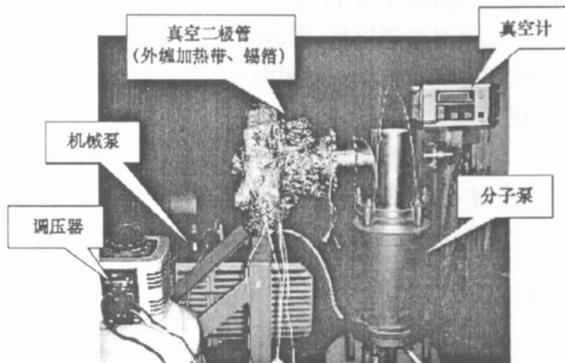


图 5 二极管加热烘烤实验装置

Fig. 5 Bake out diagram of the diode

上述数值模拟手段为加速器实际运行中真空系统的设计与优化提供了重要依据。

2 烘烤实验研究

为研究烘烤后材料放气对二极管保真空的影响, 实验中, 采取外缠加热带的方式对二极管整体进行烘烤, 提高抽气过程中的系统温度。加热带额定功率 0.88kW, 通过调节调压器电压控制加热温度。为了减少热量扩散, 在二极管外表敷了锡箔, 如图 5 所示。考虑到氟橡胶密封圈的耐热性, 加热温度控制在约 200℃。烘烤加热前二极管未曾暴露于大气。抽气历时 16h 后, 泵口压强约 8.5×10^{-5} Pa, 随后开始加热, 随着温度逐渐升高, 泵口气压快速上升, 当气压稳定并趋于下降时, 停止加热直至二极管冷却至室温, 观测泵口压强为 4.9×10^{-5} Pa。仅经过 3h 加热烘烤之后, 泵口气压从 5×10^{-4} Pa 下降一个量级, 所需的时间由原来的 6h 缩短为 1.5h。保持温度不变, 进一步增加烘烤时间, 加热过程中材料平均出气率随时间变化关系如图 6 所示。

由图 6 中出气率曲线与时间轴所围面积, 可求得加热过程中出气量与总出气量的近似比值。由

$$Q = \int q \cdot dt \tag{4}$$

以 60h 作为总的出气时间, 加热时间约 8h, 计算得加热过程中的出气量超过了总出气量的 65%。

实验记录了烘烤前后关闭真空插板阀以后气压上升曲线, 如图 7 所示, 在没有外加吸气泵的情况下, 关闭后气压基本呈线性上升。经过 200℃、8h 加热烘烤后, 二极管气压保持在 10^{-1} Pa 以下的时间相

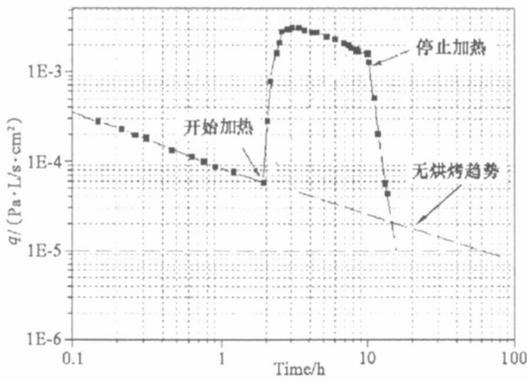


图6 烘烤过程平均出气率随时间变化
Fig. 6 Outgassing rate variation during to baking process

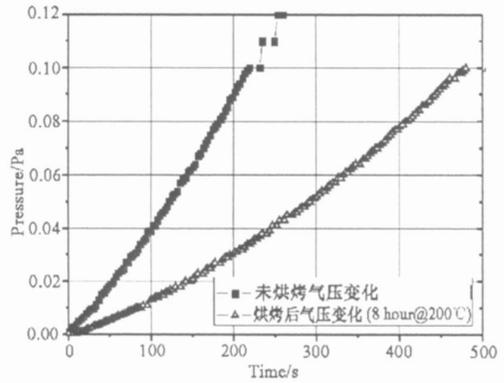


图7 烘烤前后保真空结果比较(无吸气泵)
Fig. 7 Comparison of pressure time history after pump-shut between heated and unheated (without getters)

比未烘烤时提高了近 1.5 倍。

系统经过烘烤以后, 容器内气体载荷减少了, 材料表面的初始出气率比原来下降显著, 从而使保真空的时间有所延长。短时间内可以近似以线形规律来分析容器内的气体载荷, 得到未烘烤时容器内的气体载荷为 $9.7 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{L/s}$, 经过烘烤以后容器内的气体载荷为 $4.4 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{L/s}$, 基本为烘烤之前的一半。若增加烘烤时间或提高加热温度, 保真空时间的延长将更加显著。采用陶瓷-金属全封接的二极管, 经过 48h、300°C 高温烘烤, 在高容量吸气泵作用下保真空时间可超过半年^[11]。对于加速器目前的真空处理条件, 加热烘烤是快速降低真空室气体载荷、延长保真空时间的一种有效手段。

3 总结与展望

高真空状态下, 材料出气是限制抽气时间和真空度水平的重要因素。针对一种强流加速器中的二极管部件, 通过大量的抽气数据研究其材料出气特性具有一定的实际意义。数值模拟软件的应用能够对泵、管道以及真空材料的选择提供指导, 减小实验中的盲目性; 通过二极管整体加热烘烤实验, 证明在现有条件下, 提高抽气过程中系统温度, 仍是较为有效的除气手段, 对于延长保真空时间具有重要作用。

为了从根本上解决二极管的保真空问题, 仍需要广泛吸纳超高真空系统设计思想以及硬管设计。下一步工作将积极应用陶瓷与不锈钢的钎焊技术, 使用铜垫圈代替橡胶密封圈, 采用无油前级泵, 并辅之以主动清洁和高温烘烤, 进一步提高二极管各部件的真空度水平。

参考文献:

- [1] Barker R J, Schamiloglu E. High Power Microwave Source and Technologies [M]. Wiley: IEEE Press, 2001.
- [2] Nation J A. Vacuum Equipment for Ultra High Power Microwave Experiments [R]. Ithaca, NY: Cornell University, 1999.
- [3] Miller R B. Pulsed-shortening in High-peak-power Reltron Tubes [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1998, 26(3): 340-347.
- [4] Grobner O. General Considerations in the Design of Accelerator Vacuum System [J]. J. Vac. Sci. Technol. A, 1991, 9(3): 2074-2080.
- [5] Dammertz G. Vacuum Requirements in High Power Microwave Tubes [J]. Vacuum, 1995, 48(8): 785-788.
- [6] Haworth M, Hendrick K, Englert T, et al. Recent Results in the Hard-tube MILO Experiment [C]//IEEE Int. Conf. Plasma Science, San Diego, CA, 1997.
- [7] 王晓东, 范植开, 孟凡宝, 等. 虚阴极振荡器“硬管化”实验研究 [J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(6): 969-971.
- [8] Hanlon O, John F. A User's Guide to Vacuum Technology [M]. John Wiley and Sons Inc., New York, 1980.
- [9] Xun T, Yang H W, Zhang J D, et al. A Ceramic Radial Insulation Structure for a Relativistic Electron Beam Vacuum Diode [J]. Rev. Sci. Instrum., 2008, 79(6): 3303-3307.
- [10] VacTran User's Manual [DB]. www.VacTran.com, Livermore, CA, 2006.
- [11] 杨汉武, 王勇, 张建德, 等. 强流二极管保真空技术研究 [C]//第 5 届高能电子学专业委员会学术交流会, 银川, 2006.