

空间行波管输能窗组件贮存失效分析

王国建^{*①} 赵丽^② 陆玉新^③ 田宏^① 石文奇^①

^①(中国科学院空天信息创新研究院 北京 100190)

^②(中国航天科工二院空间工程总体部 北京 100854)

^③(天津交通职业学院 天津 300110)

摘要: 高频组件是空间行波管的主要部件,是管内传播高频电磁波的重要传输部件,其中陶瓷封接部位一般采用银焊料进行焊接,它一般存放于真空柜中。存放一段时间后,组件表面出现了发黑现象。分析表明真空柜中放置的橡胶制品导致了高频组件银焊料焊接部位发生硫化,导致贮存失效。结合实验结果和理论分析,在大气状态下,橡胶套中的硫是比较稳定的。然而在真空状态下,硫是比较容易从橡胶套中升华进入真空柜中的,从而会在真空柜中弥漫大量硫蒸气,这些硫蒸气与银焊料发生化学反应形成 Ag_2S ,因此含硫的橡胶套不宜放入真空柜。

关键词: 空间行波管; 输能窗; 贮存失效

中图分类号: TN124

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)05-1480-05

DOI: 10.11999/JEIT200103

Storage of The Microwave Window of Space Traveling Wave Tubes

WANG Guojian^① ZHAO Li^② LU Yuxin^③ TIAN Hong^① SHI Wenqi^①

^①(Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China)

^②(CASIC Space Engineering Development Co., Beijing 100854, China)

^③(Tianjin Traffic Vocational Institute, Tianjin 300110, China)

Abstract: The microwave window is the main component of the space traveling wave tube and an important transmission component for transmitting high-frequency electromagnetic waves in the tube. The microwave window is generally welded with silver solder, and stored in a vacuum cabinet. After storage for some time, the microwave window surface becomes black. The analysis shows that the rubber products placed in the vacuum cabinet cause vulcanization of the silver soldered joints of the high-frequency components, leading to storage failure. Combining experimental results and theoretical analysis, the sulfur in the rubber is relatively stable under atmospheric conditions. However, in a vacuum state, sulfur is relatively easy to sublimate from the rubber into the vacuum cabinet, which will diffuse a large amount of sulfur vapor in the vacuum cabinet. These sulfur vapors react with the silver solder to form Ag_2S , so the sulfur-containing rubber should not be placed in a vacuum cabinet.

Key words: Space traveling wave tubes; Microwave window; Storage failure

1 引言

微波真空电子技术是一个历史悠久的研究领域,它包括微波电子学、材料技术、真空技术等学科^[1,2],因此我国将空间行波管列入“十一五”至“十三五”核心电子器件的重大专项课题。空间行波管作为一种重要的微波功率放大器,广泛地用于

通信、导航定位、军事测绘、微波遥感、电子侦察、数据传输等卫星,是星载转发器的核心器件^[3-5]。随着现代通信技术的发展,对空间行波管的寿命和性能等指标不断提出新的需求,这些需求主要表现在要求更长的寿命、更高的性能等^[6,7],这些需求进而对空间行波管的支撑技术的发展提出新的挑战和发展机遇^[8,9]。在空间行波管制造过程中,零件储存是其工作的基础条件,零件污染不仅对电子聚焦、输出功率、阴极发射、噪声电平有影响,而且会使管内真空变差^[10,11]。另外,由于阴极制备工艺的不一致性,许多空间行波管的阴极工作在温度限制区,残余气体对这类器件的影响更为严重^[1,12]。

收稿日期: 2019-02-12; 改回日期: 2020-10-29; 网络出版: 2020-12-14

*通信作者: 王国建 gjwang7628@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(61771454)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (61771454)

因此研究空间行波管零件存储条件具有十分重要的意义。

2 高频组件的储存

空间行波管主要由5个部分构成^[13]：电子枪、输入输出组件、螺旋线慢波组件、磁聚焦系统和收集极，其结构如图1所示。

高频输能组件包括输入输出组件。需要放大的高频信号由输入装置进入行波管中，经过放大后的信号由输出装置送出。常见的输入输出装置有波导和同轴两种。一般在频率较低或功率较小且要求工作带宽较宽时采用同轴结构，反之，则采用波导结构。在实际应用中，有时会采用输入用同轴结构，输出用波导结构。

高频组件是空间行波管的主要部件之一，是管内传播高频电磁波的一种特殊传输装置，其中的输入输能装置和输出输能装置的陶瓷封接部位一般采用银铜焊料进行焊接。高频组件一般存放于真空柜中，真空柜的极限压强低于 5×10^{-2} Pa。存放一段时间后，组件表面出现了发黑现象，如图2所示。

从图2可以看出，发黑部位主要是进行陶瓷金属封接的银焊料。经过真空检漏实验，发现零件的气密性没有被破坏，说明高频组件仅是表面被硫化，还没有扩散到焊接面内部。

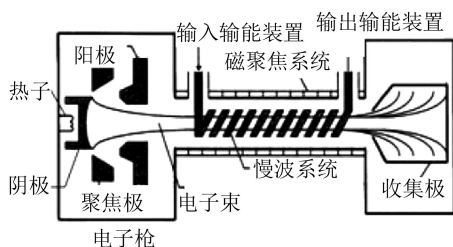


图1 空间行波管结构示意图

3 实验结果及分析

为了查明高频组件发黑的原因，利用扫描电镜对螺旋线进行了分析，图3给出了螺旋线发黑部位的表面的形貌和成分。

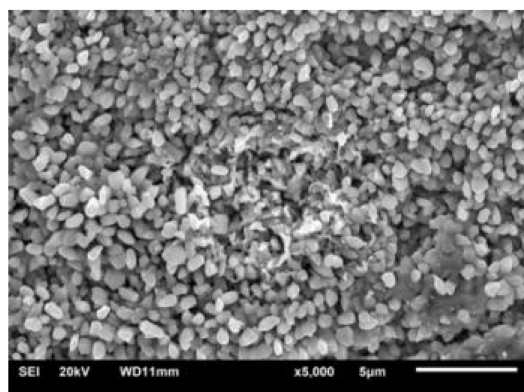
从图3的分析可以看出，真空柜中出现了硫元素，并与银焊料发生了反应，根据现场观察可知，真空柜中存在一些用于包装的橡胶套，因此怀疑硫元素来源于橡胶套。对真空柜中的橡胶套和未使用过的橡胶套进行了分析，结果如图4所示。

从图4可以看出，使用后和未使用橡胶套中硫元素发生了很大的变化，说明硫来源于橡胶套。生橡胶是一种受热易融化，开裂，耐磨性能差且质软的直链高分子聚合物，加硫之后在高温下可以使橡胶硫化，使得生胶中的部分碳碳双键打开与硫形成二硫键，硫化后的橡胶因为分子之间的交连，熔点提高而且强度增大，橡胶加硫是橡胶制作过程中不可或缺的一步。在化学中，二硫键是比较弱的化学键，在一定的条件下(如紫外线照射、加热等)会分解成单质的硫，另外硫化橡胶中也会残存一些单质硫^[14]。

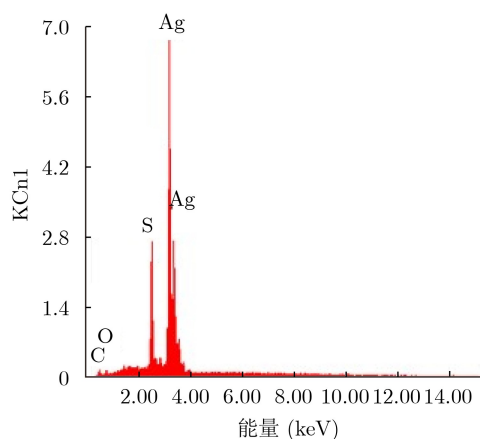
硫有多种同素异形体，化学性质比较活泼，既有还原性又有氧化性，能跟氢、氧、卤素(除碘外)、金属等大多数元素化合，生成共价型化合物



图2 真空柜中存放的高频组件



(a) 形貌



(b) 成分

图3 高频组件发黑部分的形貌和成分

或离子型化合物。硫在日常生活和工业生产中有很大用途，主要用于橡胶、氟化工、造纸、食品工业、医药等工业。

为了进一步验证上述分析结果的正确性，进行了下述3组试验。(1)将表面状态良好银焊片放入没有橡胶套真空柜里，抽真空至 5×10^{-2} Pa，室温条件下，放置10天。(2)将银焊料和橡胶套一起放置于真空存储柜中，抽真空至 5×10^{-2} Pa，室温条件下，放置10天。(3)将银焊料和橡胶套一起放置于真空存储柜中，不抽真空，室温条件下，放置10天，取出3组试验样品，进行分析，结果如图5所示。

从图5可以看出，未放入橡胶套抽真空和放入

橡胶套但未抽真空的真空柜中银焊料都没有变化。银焊料和橡胶套一起放入真空存储柜中并抽真空至 5×10^{-2} Pa，室温条件下，放置10天后，银焊料发生了变化。这些实验说明硫来源于橡胶套，但在大气状态下，橡胶套中的硫还是比较稳定的。在真空状态下，硫比较容易从橡胶套中升华进入真空柜中，在真空柜中弥漫了大量硫蒸气，这些硫蒸气与银焊料发生了化学反应形成 Ag_2S 。

任何材料加热到一定温度时就会发生气化现象，即由液相或固相进入气相。在给定的温度下，一种物质的气态与其凝聚态(固态或液态)之间会在某一个压强下存在动态平衡。这个压强就是此物质在此温度下的饱和蒸气压。具有较高蒸气压的物质

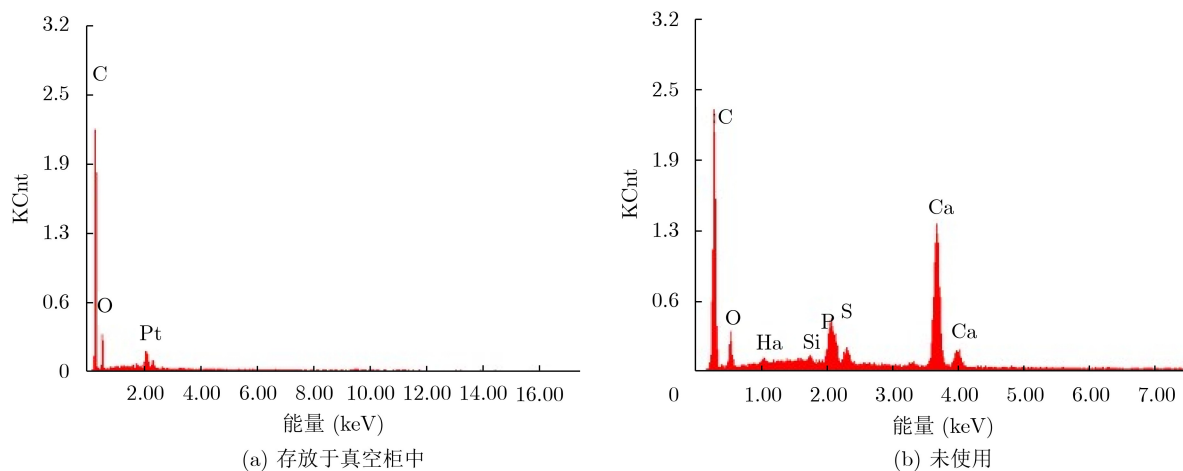


图4 橡胶套的成分

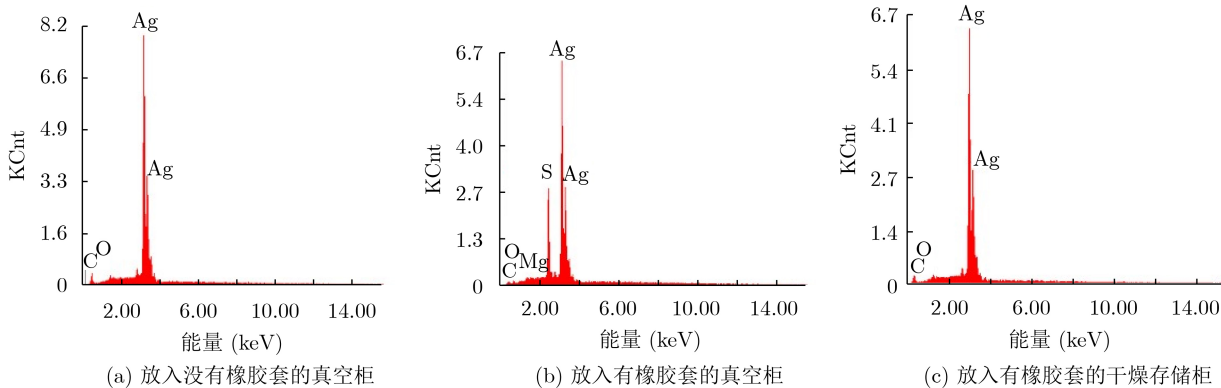


图5 银焊料片表面成分

具有较高的蒸发速率。任何物质的蒸气压都随着温度非线性增加。表1给出了硫材料蒸气压与温度的关系^[15]。

一般来说，材料在真空中只要加热到高于其饱和蒸气压以上时，均能迅速蒸发。而且材料以单原子形式蒸发进入气相^[16]。从表1可以看出硫在真空条件下蒸发比在常压下容易得多，所需的蒸发温度

大幅下降。在标准大气压下，硫必须加热到717 K(沸点)才能大量蒸发，因此在大气状态下，橡胶套中的硫是比较稳定的。然而在真空度 10^{-2} Pa的条件下，只需加热到328 K就可以大量蒸发，因此在真空状态下，硫是比较容易从橡胶套中升华进入真空柜中的，从而会在真空柜中弥漫大量硫蒸气，这些硫蒸气与银焊料发生了化学反应形成 Ag_2S 。

表1 硫的温度与蒸气压的关系

化学元素	熔点	沸点	蒸气压(133 Pa)								
			10^{-8}	10^{-7}	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	1
			温度(K)								
S	388	717	263	276	290	310	328	353	382	420	462

综上所述可知橡胶套是导致高频组件在真空柜中贮存失效的原因，因此含硫的橡胶套不宜放入真空柜。

4 结论

高频组件是空间行波管的主要部件，是管内传播高频电磁波的重要传输部件，其中陶瓷封接部位一般采用银焊料焊接，它一般存放于真空柜中，真空柜的极限压强低于 5×10^{-2} Pa。存放一段时间后，组件表面出现了发黑现象。分析表明真空柜中放置的橡胶制品导致了高频组件银焊料焊接部位发生硫化，导致贮存失效。结合实验结果和理论分析表明，在标准大气压下，硫必须加热到717 K(沸点)才能大量蒸发，因此在大气状态下，橡胶套中的硫是比较稳定的。然而真空度在 10^{-2} Pa的条件下，只需加热到328 K就可以大量蒸发，因此在真空状态下，硫是比较容易从橡胶套中升华进入真空柜中的，会在真空柜中弥漫大量硫蒸气，这些硫蒸气与银焊料发生了化学反应形成 Ag_2S ，因此含硫的橡胶套不宜放入真空柜。

参考文献

- [1] LIU Yanwen, TIAN Hong, LU Yuxin, *et al.* Influences of diamond material on heat dissipation capabilities of helical slow wave structures[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2019, 66(12): 5321–5326. doi: [10.1109/TED.2019.2945969](https://doi.org/10.1109/TED.2019.2945969).
- [2] 刘燕文, 王小霞, 田宏, 等. 纳米粒子薄膜热电子发射性能[J]. *中国科学: 信息科学*, 2015, 45(1): 145–156. doi: [10.1360/N112013-00201](https://doi.org/10.1360/N112013-00201).
LIU Yanwen, WANG Xiaoxia, TIAN Hong, *et al.* Study on emission properties of the nanoparticle films[J]. *Scientia Sinica Informationis*, 2015, 45(1): 145–156. doi:

[10.1360/N112013-00201](https://doi.org/10.1360/N112013-00201).

- [3] 康立, 卢晓春, 王雪, 等. GPS L1频点授权信号质量评估[J]. *电子与信息学报*, 2018, 40(4): 905–911. doi: [10.11999/JEIT170440](https://doi.org/10.11999/JEIT170440).
KANG Li, LU Xiaochun, WANG Xue, *et al.* Authorized signals quality assessment on GPS L1[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(4): 905–911. doi: [10.11999/JEIT170440](https://doi.org/10.11999/JEIT170440).
- [4] LIU Yanwen and TIAN Hong. Temperature variation of a thermionic cathode during electron emission[J]. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 2008, 51(9): 1497–1501. doi: [10.1007/s11431-008-0161-2](https://doi.org/10.1007/s11431-008-0161-2).
- [5] 贺成艳, 郭际, 卢晓春, 等. 北斗卫星导航系统B1信号伪距偏差问题研究[J]. *电子与信息学报*, 2018, 40(11): 2698–2704. doi: [10.11999/JEIT180074](https://doi.org/10.11999/JEIT180074).
HE Chengyan, GUO Ji, LU Xiaochun, *et al.* Researches on pseudo-range biases of BeiDou navigation satellite system B1 signals[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2018, 40(11): 2698–2704. doi: [10.11999/JEIT180074](https://doi.org/10.11999/JEIT180074).
- [6] SHIN Y M, BARNETT L R, GAMZINA D, *et al.* Terahertz vacuum electronic circuits fabricated by UV lithographic molding and deep reactive ion etching[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95(18): 181505. doi: [10.1063/1.3259823](https://doi.org/10.1063/1.3259823).
- [7] SIRIGIRI J R, SHAPIRO M A, and TEMKIN R J. High-power 140-GHz quasioptical gyrotron traveling-wave amplifier[J]. *Physical Review Letters*, 2003, 90(25): 258302. doi: [10.1103/PhysRevLett.90.258302](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.90.258302).
- [8] 刘燕文, 田宏, 韩勇, 等. 支取发射电流过程对热阴极温度影响的研究[J]. *中国科学 E辑: 技术科学*, 2008, 38(9): 1515–1520. doi: [10.1360/ze2008-38-9-1515](https://doi.org/10.1360/ze2008-38-9-1515).
LIU Yanwen, TIAN Hong, HAN Yong, *et al.* Study on the influence of discharge current on hot cathode

- temperature[J]. *China Science E*, 2008, 38(9): 1515–1520. doi: [10.1360/ze2008-38-9-1515](https://doi.org/10.1360/ze2008-38-9-1515).
- [9] 刘燕文, 田宏, 陆玉新, 等. 用于浸渍阴极的钨海绵基体的净化[J]. *真空科学与技术学报*, 2018, 38(2): 144–149. doi: [10.13922/j.cnki.cjovst.2018.02.12](https://doi.org/10.13922/j.cnki.cjovst.2018.02.12).
- LIU Yanwen, TIAN Hong, LU Yuxin, *et al.* Purification and cleaning of spongy tungsten disc used as impregnated dispenser-cathode in vacuum[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2018, 38(2): 144–149. doi: [10.13922/j.cnki.cjovst.2018.02.12](https://doi.org/10.13922/j.cnki.cjovst.2018.02.12).
- [10] WANG Xiaoxia, LIAO Xianheng, ZHAO Qinglan, *et al.* Performance of an oxide cathode prepared from submicrometer carbonates[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2011, 58(9): 3195–3199. doi: [10.1109/TED.2011.2158648](https://doi.org/10.1109/TED.2011.2158648).
- [11] 刘燕文, 田宏, 韩勇, 等. 新型的覆纳米粒子薄膜阴极的研究[J]. *物理学报*, 2009, 58(12): 8635–8642. doi: [10.7498/aps.58.8635](https://doi.org/10.7498/aps.58.8635).
- LIU Yanwen, TIAN Hong, HAN Yong, *et al.* Emission properties of impregnated cathode with nanoparticle films[J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 58(12): 8635–8642. doi: [10.7498/aps.58.8635](https://doi.org/10.7498/aps.58.8635).
- [12] LIU Yanwen, TIAN Hong, HAN Yong, *et al.* Study on the emission properties of the impregnated cathode with nanoparticle films[J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2012, 59(12): 3618–3624. doi: [10.1109/TED.2012.2219583](https://doi.org/10.1109/TED.2012.2219583).
- [13] 廖复疆, 吴固基. 真空电子技术-军事电子装备的心脏[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001: 12.
- LIAO Fujiang and WU Guji. *Vacuum Electronics-the Heart of Military Electronic Equipment*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001: 12.
- [14] 李咏今. 丁腈硫化胶烘箱加速老化与室内自然老化相关性的研究[J]. *特种橡胶制品*, 2001, 22(4): 51–56, 33. doi: [10.16574/j.cnki.issn1005-4030.2001.04.017](https://doi.org/10.16574/j.cnki.issn1005-4030.2001.04.017).
- LIU Yongjin. Study on the correlation of oven accelerated aging and room temperature auto age for NBR[J]. *Special Purpose Rubber Products*, 2001, 22(4): 51–56, 33. doi: [10.16574/j.cnki.issn1005-4030.2001.04.017](https://doi.org/10.16574/j.cnki.issn1005-4030.2001.04.017).
- [15] 刘联保, 莫纯昌. 电子工业生产技术手册(4): 电真空器件卷[M]. 北京: 国防工业出版社, 1990: 317.
- LIU Lianbao and MO Chunchang. *Technical Manual for Electronic Industry(4)*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1990: 317.
- [16] 刘燕文, 王小霞, 陆玉新, 等. 用于电真空器件的金属材料蒸发特性[J]. *物理学报*, 2016, 65(6): 068502. doi: [10.7498/aps.65.068502](https://doi.org/10.7498/aps.65.068502).
- LIU Yanwen, WANG Xiaoxia, LU Yuxin, *et al.* Study on evaporation from alloys used in microwave vacuum electron devices[J]. *Acta Physica Sinica*, 2016, 65(6): 068502. doi: [10.7498/aps.65.068502](https://doi.org/10.7498/aps.65.068502).
- 王国建: 男, 1980年生, 硕士, 副研究员, 研究方向为微波真空电子器件及关键工艺技术.
- 赵 丽: 女, 1987年生, 工程师, 研究方向为微波真空电子器件及关键工艺技术.
- 陆玉新: 女, 1967年生, 副教授, 研究方向为物理电子学.
- 田 宏: 女, 1972年生, 实验师, 研究方向为电子发射.
- 石文奇: 男, 1996年生, 博士生, 研究方向为用于微波真空器件的光电阴极.

责任编辑: 陈 倩