



航天器环境工程

SPACECRAFT ENVIRONMENT ENGINEERING

中国科技核心期刊

低PIM吸波装置的设计与性能测试

杜春林 任晓宇 常冬林 秦家勇 王海林 吕剑锋 王晶

Design and performance test of a low PIM absorber

DU Chunlin, REN Xiaoyu, CHANG Donglin, QIN Jiayong, WANG Hailin, LÜ Jianfeng, WANG Jing

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12126/see.2020.04.013>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

用于热真空环境下整星微波无线测试的低PIM吸波热沉研制

Development of low-PIM absorbing heat sink in microwave load wireless test for spacecraft in thermal vacuum environment

航天器环境工程. 2017, 34(4): 370–375 <https://doi.org/10.12126/see.2017.04.005>

吸波外热流模拟装置等效热分析模型

Equivalent model for heat flux analysis of microwave absorber

航天器环境工程. 2018, 35(5): 409–413 <https://doi.org/10.12126/see.2018.05.001>

吸波热沉在微波雷达成像卫星真空热试验中的应用

Application of microwave absorbing heat sink in the thermal vacuum test of microwave radar imaging satellite

航天器环境工程. 2017, 34(5): 505–509 <https://doi.org/10.12126/see.2017.05.009>

砷化镓太阳能电池表面高透光率吸波材料结构设计与性能研究

Structure design and performance of high light transmittance and electromagnetic transparent materials attached onto GaAs solar cell

航天器环境工程. 2019, 36(2): 191–197 <https://doi.org/10.12126/see.2019.02.015>

基于半导体制冷的星载CCD测试用低温环境装置设计

Design of a low-temperature equipment for spaceborne CCD test based on semiconductor refrigeration

航天器环境工程. 2019, 36(1): 95–102 <https://doi.org/10.12126/see.2019.01.015>

基于准零刚度技术的微重力模拟悬吊装置设计与试验研究

Design and experiment of a suspension device based on quasi-zero-stiffness technology for microgravity simulation

航天器环境工程. 2017, 34(2): 222–228 <https://doi.org/10.12126/see.2017.02.019>

低 PIM 吸波装置的设计与性能测试

杜春林¹, 任晓宇¹, 常冬林¹, 秦家勇¹, 王海林², 吕剑锋¹, 王 晶¹

(1. 北京卫星环境工程研究所, 北京 100094; 2. 空间电子信息技术研究院, 西安 710100)

摘要: 为了解决在空间环境模拟器 (简称“容器”) 内开展无源互调 (Passive Intermodulation, PIM) 测试的技术难题, 验证温度变化对航天器系统级 PIM 性能的影响, 需要在容器内建立一个低 PIM 的吸波环境。即在容器内安装一种封闭的低 PIM 吸波装置, 使星上被测无源器件完全被其包敷, 然后通过模拟温度应变过程完成测试工作。文章介绍了 PIM 指标小于 -150 dBm 的低 PIM 吸波装置的设计思路和常压热循环测试过程, 并对测试结果进行了分析, 确定该吸波装置 PIM 性能满足试验测试要求。

关键词: 无源互调; 无源器件; 吸波装置; 常压热循环

中图分类号: TN972

文献标志码: A

文章编号: 1673-1379(2020)04-0397-05

DOI: [10.12126/see.2020.04.013](https://doi.org/10.12126/see.2020.04.013)

Design and performance test of a low PIM absorber

DU Chunlin¹, REN Xiaoyu¹, CHANG Donglin¹, QIN Jiayong¹, WANG Hailin², LÜ Jianfeng¹, WANG Jing¹

(1. Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China;

2. Institute of Space Electronic Information Technology, Xi'an 710100, China)

Abstract: In order to meet the requirement of the passive intermodulation(PIM) testing in a space environmental simulation chamber and to study the impact of the temperature changes on the performance of the spacecraft system-level PIM, a low-PIM absorbing environment has to be established in the chamber. The method adopted in this paper is to install a low PIM wave absorbing device in the chamber, so that the passive devices under the test is completely covered by it, and then the testing is completed by simulating the temperature strain process. The design philosophy and the atmospheric thermal cycling test process of the low-PIM absorber with a PIM index less than -150dBm are described. The testing results are analyzed, and the PIM performance of the absorber is shown to be able to meet the test requirements.

Keywords: passive intermodulation; passive components; wave absorbing device; atmospheric thermal cycling

收稿日期: 2020-01-08; 修回日期: 2020-07-16

引用格式: 杜春林, 任晓宇, 常冬林, 等. 低 PIM 吸波装置的设计与性能测试[J]. 航天器环境工程, 2020, 37(4): 397-401

DU C L, REN X Y, CHANG D L, et al. Design and performance test of a low PIM absorber[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2020, 37(4): 397-401

0 引言

随着多载波大功率卫星的发展,因系统的非线性而产生的无源互调(Passive Intermodulation, PIM)干扰已成为决定卫星任务成败的重要因素。当多个信号通过非线性器件或非线性系统传输时,输出就会产生互调产物;随着输入功率的增大,产生的无源互调干扰就会越来越严重。在收发共用天线系统中,如果干扰信号落入了接收通道,就会影响卫星G/T的值,轻则干扰卫星接收系统的正常工作,严重时导致卫星失效^[1]。

研究表明,在大功率卫星通信系统和移动通信系统中,微波器件的PIM干扰产生的来源可归类为材料非线性和接触非线性,但其产生机理非常复杂,有一定的随机性,建立理论模型难度很大,最有效的方法就是对PIM进行实际测量^[2-3]。

为了实现对PIM进行实际测量,必须建立低PIM的背景测试环境。本文介绍了一种低PIM吸波装置的设计原理、结构设计方法、指标测试过程及结果,并提出了后续工作设想。

1 吸波装置研制

1.1 材料选择

从实际需求出发,电性能是吸波材料选择首先要考虑的因素,包括反射率和功率耐受性;考虑到材料的应用环境是常压高温或真空低温,因此材料的环境适应性也必须考虑,包括可凝挥发物(CVCM)、热导率、表面发射率和真空质损(TML)等。通过文献调研^[4-6],发现目前工艺比较成熟的碳化硅、铁氧体、碳泡沫和石墨烯等材料都可以作为备选材料,但考虑实际应用中生产时间、加工性能、研制成本和维修便利性等因素,最终确定使用碳化硅材料,其材料特性参数及测试值见表1。

表1 碳化硅吸波材料特性
Table 1 Properties of silicon carbide absorbing materials

材料特性参数	参数值
S波段反射率/dB	-20
功率耐受性/(W·m ⁻²)	2000
可凝挥发物(CVCM)/%	0.02
热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	5.4
表面发射率	0.867
真空质损(TML)/%	0.06

1.2 设计原理

本项目研制过程中采用的是碳化硅角锥阵列的微波吸收方式。研究表明:角锥结构的吸波性能与角锥高度、入射波的入射角度以及材料的电磁参数等因素存在复杂的关系。对于给定的材料而言,当电磁波垂直入射时,反射率随角锥高度的增加先是降低,到达一临界值后突增,因此,合理的角锥尺寸、适当的电磁参数对降低材料的反射率至关重要(如图1所示)^[7]。

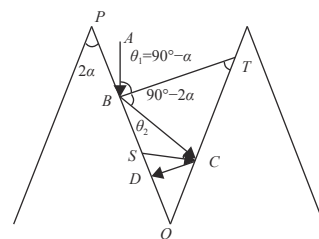


图1 角锥型吸波材料原理分析

Fig. 1 Principle analysis of pyramidal wave absorbing material

在吸波装置研制过程中,综合利用等效媒质分析法、几何光学分析法、全波仿真分析法3种理论方法,对吸波组件角锥高度、底部结构尺寸、工艺拼接关键控制参数进行了全面分析,得出了具有指导性的理论数据,为吸波结构设计提供了理论设计依据。

1)角锥高度最低取一个工作波长,在可能的情况下,角锥越高,吸波材料与空气的匹配越好,反射系数越小;

2)对碳化硅角锥而言,半顶角大小取10°~12°,综合吸波效果最好;

3)角锥底部的方形底座,其厚度越大,吸波效果越好;对角锥底部基座,其宽度变化对反射系数影响稍微复杂一些,存在一个“最优”的宽度尺寸,工程上一般选择一个工作波长的宽度。

1.3 结构设计

1.3.1 吸收模块

吸收模块(如图2所示)是吸波装置的一个基本单元,一般采用角锥结构或角锥复合结构^[7],该结构由专用的锥形吸收体(简称:角锥)和安装板组成,组装时使用低挥发率的硅橡胶进行填充固定,保证了角锥和安装板之间的导热性能和结合强度。吸收模块具有良好的吸波性能,在试验规定频段范围内反射率≤-25 dB。

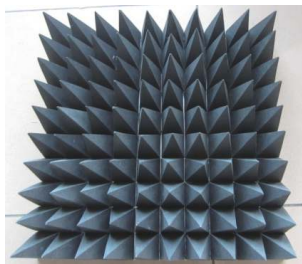


图 2 吸收模块实物图
Fig. 2 The absorption module

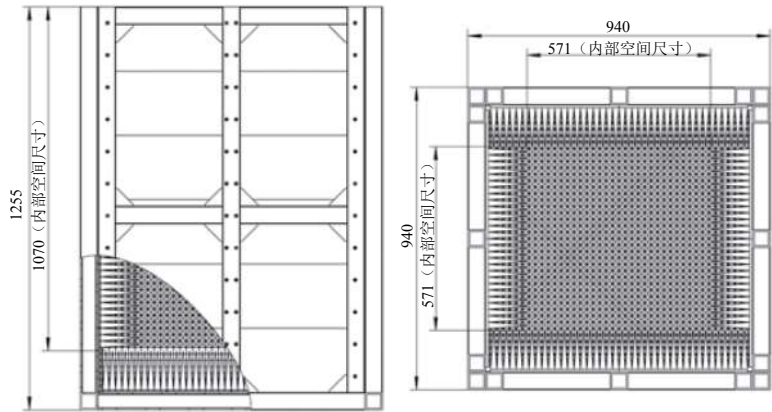


图 3 吸波装置尺寸
Fig. 3 Dimension of the absorbing device

2 吸波装置 PIM 性能测试

2.1 测试方案

采用双天线法测试吸波装置 PIM 性能。测试原理框图如图 4 所示。测试中使用 2 个测试天线，每个测试天线按指定功率输入单载波，其中 1 个测试天线后接双工器以接收吸波装置产生的 PIM 功率。2 个测试天线通过非金属固定板与吸波装置对接，出于测试系统安全考虑，2 个测试天线中心距 $\geq 200\text{ mm}$ (本次测试为 200 mm)。测试过程中工况温度范围为 $-60\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，共进行 4 个循环。

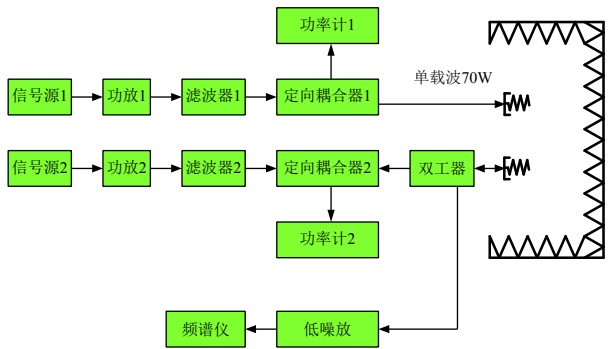


图 4 小型吸波装置 PIM 测试原理
Fig. 4 Principle of PIM testing of the small absorbing device
测试前，测试系统需进行标定和自检，自检结果 PIM 电平低于测试系统本底噪声。

1.3.2 整体结构

吸波装置采用铝合金方管作为框架进行组装，采用可拆卸设计。为保证吸波装置的吸收效果，防止信号反射，吸波装置内部均全部覆盖吸收模块，且在箱体转角处采用了多种角度的角锥和平片锥体等吸收模块进行组合拼装^[8]。吸波装置整体结构和尺寸如图 3 所示。

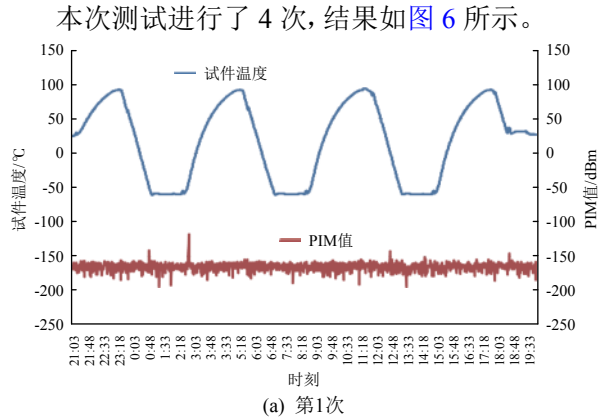
2.2 测试实施

本次测试在常压高低温环境下进行，使用的常压高低温箱容积为 6 m^3 ，温度能力范围为 $-90\sim 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[9]，可以实现工况测试所需要的 $-60\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度范围。测试现场如图 5 所示。



图 5 测试现场
Fig. 5 Configuration of the testing

2.3 测试结果



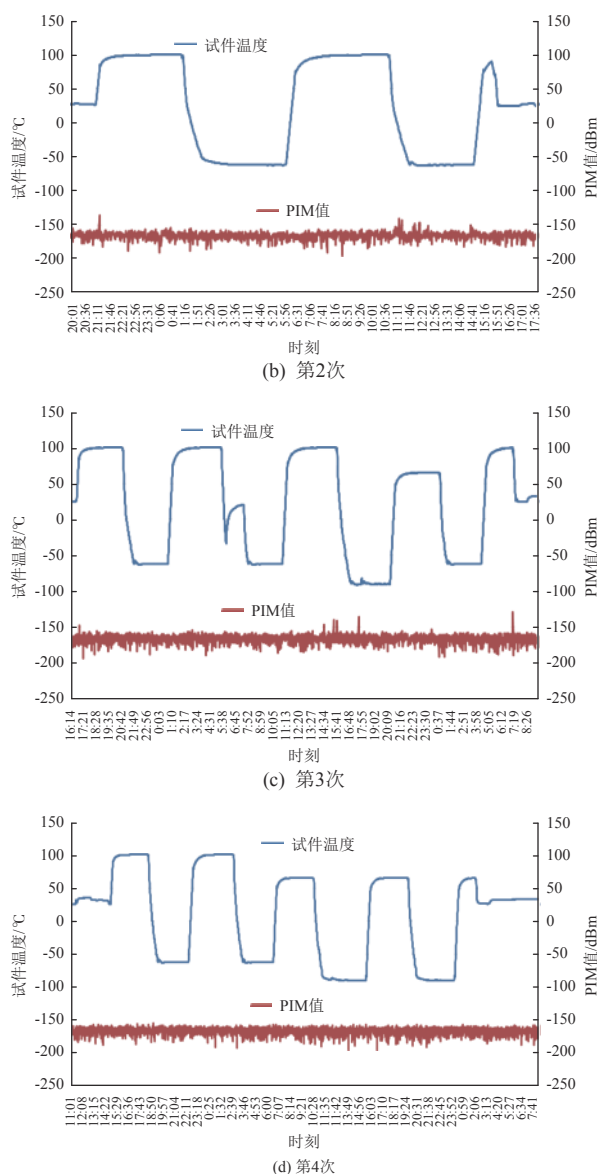


图6 吸波装置测试结果

Fig. 6 Testing results of the absorbing device

2.4 结果分析

1)第1次测试的PIM值多次出现较大幅度的波动,最大值约-118.49 dBm,出现温度-40℃以下及-60℃保持阶段。本次测试的温度测点(铂电阻)粘贴在吸波装置内部的角锥上,测试过程中该铂电阻测点位于微波场内,可能成为PIM源。这种测试状态不能真实反映出吸波装置的PIM值,因此必须将测点取出粘贴在微波场以外(高频电缆上),并根据第1次测试时吸波装置内外温度平衡的时间差安排第2阶段的工况时间。

2)第2次测试的PIM值集中在第二循环低温降温及-60℃保持阶段出现较大幅度的波动,最大

值约-123.58 dBm。经仔细查找吸波装置在高低温循环后的变化原因,发现吸波装置底部出现较明显的缝隙,该缝隙是PIM源,因而需要对吸波装置的组装方式进行改进。

3)吸波装置结构改进后进行了第3次测试,PIM值在低温降温及保持阶段均未出现超过技术指标的跳动,但在高温(升降温及保持)阶段均出现较大幅度的波动,最大值约-129.41 dBm。打开常压箱查看,未发现吸波装置在结构上有何变化;此时发现测试天线的非金属固定板与吸波装置上端面平齐,非金属固定板与吸波装置侧面边缘缝隙等位置会有微波泄漏,成为PIM源。

4)第4次测试,将2个测试天线伸到吸波装置内部,测试天线顶部距离底部吸波装置尖锥距离为500 mm。测试中所有高低温工况期间的PIM值均在-150 dBm以下,可以确定该吸波装置PIM性能满足试验要求。

3 结论与展望

本次吸波装置研制和测试的目的是为后续大型吸波装置的研制和使用提供明确的研制工艺和控温数据参考,后续工作还需关注很多问题,主要包括:

1)大型吸波装置是赋形结构,而且还涉及到活动模块,因此在拐角和对接处需要进行特殊处理,既要满足低PIM要求又要考虑不能产生多余物;

2)本次测试所用吸波装置,其研制中的多项工艺如安装板对接处封堵工艺、拐角处的拼接工艺等都是为了达到PIM值优于-150 dBm的指标而增加的,增加了研制成本和研制周期;

3)考虑到吸波材料可能会产生多余物的风险,需要对特殊位置的吸波材料进行防护处理,以确保产品安全;

4)碳化硅材料导热率很低,控温设施的设计需要考虑大型结构的温度梯度和均匀性问题。

参考文献 (References)

- [1] 蔡晓宏. 多载波卫星系统中无源互调问题的研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2003: 1
- [2] 童超. 大功率条件下传输线无源互调技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2014: 11
- [3] 叶鸣, 贺永宁, 孙勤奋, 等. 大功率条件下的无源互调干扰

- 问题综述[J]. [空间电子技术](#), 2013(1): 75-83
- YE M, HE Y N, SUN Q F, et al. Review of passive intermodulation interference problem under high power signals[J]. *Space Electronic Technology*, 2013(1): 75-83
- [4] 陶禹, 李步云, 邓爱明, 等. 高温吸收剂研究进展及改性碳化硅吸波特性[J]. [表面技术](#), 2011, 40(3): 88-104
- TAO Y, LI B Y, DENG A M, et al. Progress of the high-temperature absorbers and modified SiC absorbing performance[J]. *Surface Technology*, 2011, 40(3): 88-104
- [5] 刘十一, 卢安平, 李渊. 尖劈吸波体的研究和微波暗室的模拟[J]. [数学的实践与认识](#), 2012, 42(14): 122-133
- LIU S Y, LU A P, LI Y. Research on wedge-shaped microwave absorber and simulation of microwave anechoic chamber[J]. *Mathematics in Practice and Theory*, 2012, 42(14): 122-133
- [6] 刘丹莉, 刘平安, 杨青松, 等. 吸波材料的研究现状及其发展趋势[J]. [材料导报](#), 2013, 27(17): 74-76
- LIU D L, LIU P A, YANG Q S, et al. Research status and prospect of wave absorbing materials[J]. *Materials Review*, 2013, 27(17): 74-76
- [7] 刘顺华, 刘军民, 董星龙, 等. 电磁波屏蔽及吸波材料[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013: 254-256
- [8] 杜春林, 秦家勇, 尹晓芳, 等. 用于热真空环境下整星微波无线测试的低 PIM 吸波热沉的研制[J]. [航天器环境工程](#), 2017, 34(4): 370-375
- DU C L, QIN J Y, YIN X F, et al. Research on microwave load wireless PIM test of spacecraft in thermal vacuum environment[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2017, 34(4): 370-375
- [9] 秦家勇, 柳晓宁, 刘畅, 等. 控温型吸波箱温度均匀性研究[J]. [航天器环境工程](#), 2017, 34(1): 56-62
- QIN J Y, LIU X N, LIU C, et al. Temperature uniformity of temperature-control type microwave absorbing box[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2017, 34(1): 56-62

(编辑: 王 洋)