

真空低温环境下碳泡沫吸波材料电磁性能测试研究

杜春林* 秦家勇 王宇辰 申彬
(北京卫星环境工程研究所 北京 100094)

Electromagnetic Performance Testing of Carbon Foam Absorbing Materials in Vacuum and Low-Temperature Environments

DU Chunlin*, QIN Jiayong, WANG Yuchen, SHEN Bin
(Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China)

Abstract With the rise of low-orbit internet satellite constellations and the development of satellite antenna technology, joint wireless testing of satellites and antennas in a thermal vacuum environment has become a new testing mode to increase test coverage. Therefore, it is necessary to establish a comprehensive thermal test environment with high vacuum, low temperature, and low microwave reflectivity. This article analyzes and identifies the key parameters that need attention when applying absorbing materials in vacuum and low-temperature environments and provides reference indicators. The technical process, testing content, and results of the development of a microwave-absorbing heat sink based on carbon foam-absorbing materials with low microwave reflectivity and low passive intermodulation (PIM) indicators are presented.

Keywords Thermal vacuum test, Carbon foam, Passive intermodulation, Absorbing heat sink

摘要 随着低轨互联网卫星星座的兴起和卫星天线技术的发展,开展热真空环境下卫星与天线联合无线测试成为新的试验模式,以增加测试覆盖性。为此,需要建立一个具备高真空、低温、低微波反射率的综合热试验环境。文章通过分析确定了吸波材料应用于真空低温环境下需要关注的关键参数,并给出了参考指标;提出了基于碳泡沫吸波材料的低微波反射率和低无源互调(Passive Intermodulation, PIM)指标的吸波热沉的研制技术流程、测试内容及结果。

关键词 热真空试验 碳泡沫 无源互调 吸波热沉

中图分类号: V45 文献标识码: A doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202409014

国内传统的航天器真空热试验都是采用有线测试的,即卫星有效载荷连接高频或低频电缆,通过密封的真空法兰引出到容器外,在与地面测试设备连接,完成试验测试。随着近几年卫星天线技术的发展及低轨互联网卫星星座的兴起,研制流程中提出了在卫星进行真空热试验过程中进行无线测试,以实现测试的覆盖性和有效性。正是由于这一需求,需要在真空低温环境下建立吸波环境,吸波环境还必须覆盖卫星测试所需的频段。

吸波材料是建立吸波环境的核心组成部分,其基本原理是将电磁波转换为热能、电能或机械能等其他形式的能量而消耗掉。吸波材料的发现和使

用源于雷达隐身技术,作为核心部分,吸波材料因其技术相对简单,设计难度相对较低而成为军事材料领域研究的热点^[1]。除了在军事隐身领域,吸波材料也是微波暗室、电磁信息泄漏防护、电磁辐射防护、建筑吸波材料等国防军工与民用技术领域中的关键材料^[2]。本文分析了吸波材料用于真空低温环境时需要关注的关键参数,提出了对应的参考指标要求,并尝试开展了真空低温环境下吸波材料的电磁性能测试。

1 吸波材料发展

自上世纪70年代,吸波材料开始在军用与民

应用领域应用,主要应用于常温大气环境^[2]。近年来,随着我国空间站建设和探月工程的稳步推进,各类航天器及相关地面测试设备对吸波材料的需求日益迫切,主要包括:一是用于反地基或天基雷达探测,即空间隐身材料;二是用于空间站、卫星等航天器天线在轨性能测试,即仿真空环境暗室材料,因此迫切需要开展能够在航天器在轨环境条件下使用的吸波材料。

本文针对航天器天线热真空试验环境下性能测试问题,系统阐述模拟空间热真空环境下碳泡沫吸波材料的设计及应用吸波热沉技术。

2 关键参数确定与结构定型

2.1 参数影响分析与确定

理想的吸波材料应当具有吸收频带宽、质量轻、厚度薄、物理力学性能好、使用简便等特点^[3];雷达隐身技术中所使用的吸波材料要满足“薄、轻、宽、强”和耐腐蚀性等要求^[4]。但在真空低温环境下,航天器无线测试用吸波材料是否需要具备薄、宽、轻、强的特点,分析如下:(1)目前使用的吸波材料的结构形式均为角锥结构,属于结构型而非涂敷型,吸波材料作为试验工装不与参试产品有接触,因此可以有一定的高度;(2)卫星一般会涉及到不同频段和带宽的天线,而且不同卫星涉及的频段也不尽相同,所以吸波材料只须满足该卫星对应频段的反射率要求,因此频带“宽”可不作为关键参数;(3)测试过程中吸波材料为静态并可进行控温,因此对结构强度要求不高;(4)吸波材料一般通过金属框架安装,重量轻可以减小金属框架在温度交变环境下的变性,进而保持吸波装置吸波性能的稳定性,因此“轻”可作为一项关键参数。

基于以上分析可知,反射率、密度是吸波材料在真空低温环境下使用时需要考虑的关键参数,此外,还应考虑环境适应性:如可凝挥发物、水汽回吸率、表面发射率、真空质损等参数。根据目前已经使用的吸波箱的实测数据,推荐吸波材料的关键参数参考指标见表1。

2.2 性能测试与选择

选定吸波材料时,性能参数的指标都需要经过权威机构的测试。根据前期的文献调研及性能测试结果,初步选择碳泡沫和碳化硅2种材料;每种材料的又有开孔泡沫和闭孔泡沫2种结构形式,同时

泡沫材料的网格结构大小也不相同,因此需要根据试验环境进行材料的选择,本项目中,考虑到真空低温的使用环境,要求材料不能有密闭空间,因此选择开孔式泡沫材料,同时考虑成本要低,所以本项目选择的是开孔碳泡沫材料作为研究对象,碳泡沫材料(以下简称“碳泡沫”)属于结构型、介电损耗型吸波材料。

碳泡沫材料的关键参数如下:对应试验频率的反射率-28 dB,密度小于 0.5 g/cm^3 ,可凝挥发物小于0.01%,水汽回吸量为0.85%,表面发射率为0.896,真空质损为1.39%。均优于表1所列举的参考指标。此外,材料的导热系数也是需要关注的一个参数,碳泡沫材料导热系数为 $0.45 \text{ W/K}\cdot\text{m}$ 。

表1 吸波材料关键参数

Tab. 1 The key parameters of wave-absorbing materials

关键参数	参考指标
反射率	小于-25 dB
密度	小于 3 g/cm^3
可凝挥发物(CVCM)	小于0.1%
水汽回吸率	小于1%
表面发射率	大于0.85
真空质损(TML)	小于2%

2.3 碳泡沫材料结构定型研究

开孔结构碳泡沫吸波材料如图1所示。碳泡沫通过预制体成型和高温热解工艺制备,具有优异的宽带频响特性。通过热解工艺来控制碳泡沫电导率,进而调控电磁参数,常温下采用波导法测得碳泡沫材料1-18 GHz宽频电磁参数如图2所示。



图1 开孔碳泡沫吸波材料

Fig. 1 Open-cell carbon foam absorbing material

由麦克斯韦方程可知:材料与电磁波相互作用,在宏观上可用2个基本参数,即介电参数 ϵ 和磁导率 μ 表征材料的电磁特性,这2个参数均为复数。碳泡沫属于介电损耗型吸波材料,因此重点考核介

电参数 ε 。在交变电磁场条件下:

$$\varepsilon = \varepsilon' - i\varepsilon'' \quad (1)$$

式中: i 为虚数单位, 工程上一般用相对介电常数 ε_r 表征材料的特性。

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \varepsilon_r' - i\varepsilon_r'' \quad (2)$$

式中 ε_0 为材料在自由空间的介电常数参数值。

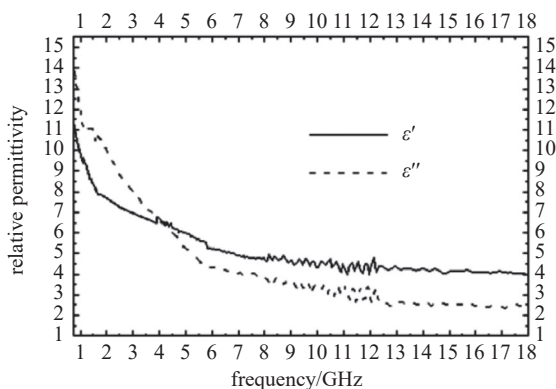


图2 开孔碳泡沫宽频电磁参数

Fig. 2 Broad-frequency electromagnetic parameters of open-cell carbon foam

介电常数的实部和虚部都有具体的物理意义: 实部可以表征材料在电场作用下发生极化的程度, 虚部则是材料在电场中发生极化时耗能的量度; 而吸波材料的电磁参数往往与吸波材料的组成成分、结构尺寸、微观形貌等有着密切联系。据此开展碳泡沫的电磁仿真设计, 确定了一体化组合碳泡沫角锥的具体尺寸, 如图3所示: 平板碳泡沫 A 厚 14 mm; 尖锥碳泡沫 B 下底边长 50 mm×50 mm, 上底边长 5 mm×5 mm, 高 70 mm。

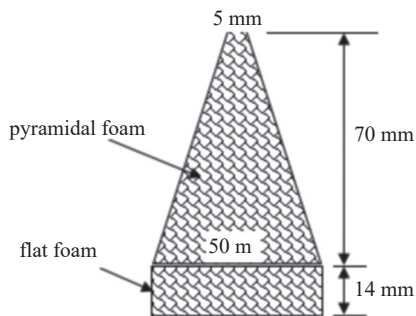


图3 碳泡沫组合结构仿真模型与具体尺寸

Fig. 3 Simulation model and specific dimensions of the combined structure of carbon foam

在第三方鉴定部门提供的碳泡沫吸波性能的实测结果如图4所示, 仿真和实测结果均表明: 在试验要求频段内碳泡沫吸波性能优于-28 dB。

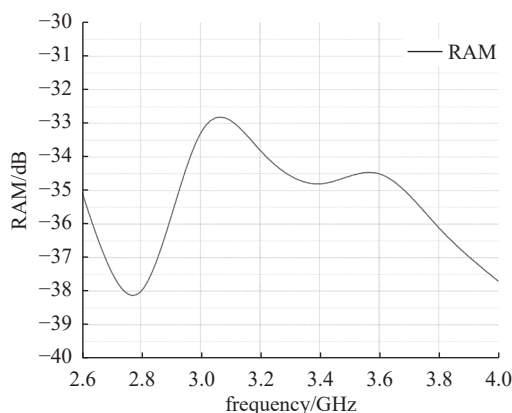


图4 碳泡沫角锥吸波性能第三方测试结果

Fig. 4 Third-party test results of the absorbing performance of the carbon foam pyramid structure

2.4 吸波热沉研制

选定材料后, 再确定吸波材料的结构形式, 并固化组装工艺, 完成吸波装置原理样机的研制, 用来进行真空低温环境下的吸波性能的测试。验证试验不通过, 则需改进原理样机并再次进行测试, 测试满足要求后, 研制正式试验所需的吸波装置, 开展正式的试验测试。

3 真空低温性能测试

3.1 必要性

国内吸波材料电磁性能的常温测试技术已经很成熟^[5], 在高温电磁性能测试方面, 西北工业大学、北京航空材料研究院等单位已开展了多年的研究工作^[6-7], 并取得了显著进展, 但是, 目前国内对吸波材料低温下电磁性能的测试技术研究还没有系统的开展, 图4中的测试结果可能无法准确表征。因此, 开展吸波材料在真空低温环境下电磁性能测试技术研究, 对掌握吸波材料在空间环境下的电磁特性及变化规律, 设计开发出高性能的吸波材料具有重要意义。

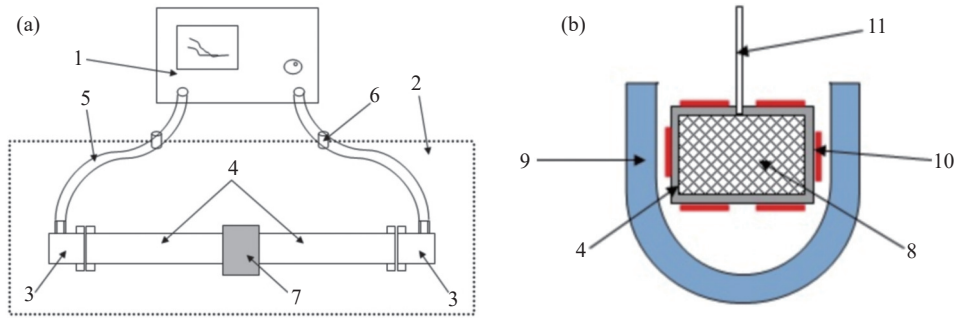
考虑到一方面要避免试样表面在低温下结霜凝露, 另一方面要尽可能使试样周围接近空间环境, 本文以空间环境模拟器建立真空环境平台^[8], 通过液氮制冷热沉和电加热片控温, 尝试采用波导法开展吸波材料真空低温电磁性能测试及吸波规律研究。

3.2 测试方法

波导法是测试材料电磁参数的常用方法, 基于波导法来搭建吸波材料真空低温电磁性能测试系统, 如图5所示, 矢量网络分析仪(简称“矢网”)放

置于空间环境模拟器外,两个波导同轴转换和两段直波导放置于空间环境模拟器内,两波导同轴转换连接空间环境模拟器内的两段同轴线,空间环境模拟器内外的同轴线通过真空穿舱 SMA 转接头连接,外面的两段同轴线连接矢网。两段直波导对接处为低温区,低温区波导外壁贴附电加热片,周围为

液氮制冷 U 形热沉,低温区波导内腔放置待测吸波材料试样,在吸波材料试样处的波导壁钻 $\phi 3\text{ mm}$ 小孔,插入测温热偶,通过调节 U 形热沉中液氮流量和加热片电流来控制吸波材料试样的温度。为防止低温损伤两波导同轴转换,采用 500 mm 长直波导来减少传热,加以保护。



In the figure: 1-Vector Network Analyzer (VNA), 2-Space Environment Simulator, 3-Waveguide to Coaxial Converter, 4-500 mm Long Straight Waveguide, 5-Coaxial Cable, 6-Vacuum Feedthrough SMA Adapter, 7-Cryogenic Zone, 8-Absorbing Material, 9-Liquid Nitrogen Cooled U-shaped Heat Sink, 10-Heater, 11-Temperature Measuring Thermocouple.

图5 吸波材料真空低温电磁参数测试示意图。(a)测试系统图,(b)低温区断面图

Fig. 5 Schematic diagram of vacuum low-temperature electromagnetic parameter test of absorbing materials. (a) Test system diagram, (b) low temperature zone profile

测试过程如下:首先在空间环境模拟器内外将矢网、同轴线和波导同轴转换连接好,然后开启矢网,通过波导标准件对同轴线和波导同轴转换进行TRL校准,完成校准后将两段直波导与两个波导同轴转换连接,在两段直波导连接处(低温区)放置吸波材料试样,并确定试样的准确位置和厚度,插入热偶,然后在两直波导连接处贴附电加热片,装载U形制冷热沉。关闭空间环境模拟器舱门,抽真空达 $2 \times 10^{-4}\text{ Pa}$,先测试试样室温真空下的电磁参数,再通液氮将试样温度降至最低温度并保温 30 min 后测试其电磁参数,然后通过贴片加热和液氮流量控制使试样温度逐步升高、逐步保温 30 min 后测试其电磁参数,进而表征吸波材料在不同低温下的电磁性能及变化规律。

上述测试过程中在 KM2 级别空间环境模拟器中进行,采用 BJ14 波导同轴转换及相匹配的直波导,测试吸波材料在 1.2 GHz~1.7 GHz 频段不同低温下的电磁参数,采用吸波材料为 8 mm 厚碳泡沫吸波材料。

3.3 测试结果与分析

在测试中通过热沉中的液氮制冷可将碳泡沫吸波材料降温、控温至 -152°C 的最低温,再通过控

制贴片加热电流和液氮流量进行室温至 -152°C 之间几个温度点的控温,最终完成碳泡沫吸波材料在高真空环境中室温、 -40°C 、 -50°C 、 -70°C 、 -85°C 、 -105°C 、 -125°C 、 -134°C 、 -152°C 的 1.2 GHz~1.7 GHz 频段电磁参数测试。

碳泡沫材料为无磁的介电损耗型吸波材料,仅测试其复介电常数值即可。图 6 和图 7 分别为碳泡沫吸波材料在不同低温下介电常数实部(ϵ')和虚部(ϵ'')频响曲线,图 8 为碳泡沫吸波材料在不同低温下介电损耗(ϵ''/ϵ')频响曲线, $\tan\delta = \epsilon''/\epsilon'$ 是用来量化表征吸波材料的介电损耗能力的指标,一般情况下,在一定范围内介电损耗角正切值越大,表明吸波材料的介电损耗性能越好。

由图 6、图 7 和图 8 可知:

(1)从室温到 -152°C 低温,碳泡沫吸波材料保持了频响特性,即介电实部值 ϵ' 和介电虚部值 ϵ'' 均保持了随频率升高逐步减小的趋势(随温度降低减小幅度有所下降),这有利于宽频吸波;

(2)从室温到 -40°C 低温,碳泡沫吸波材料在各频点的介电实部值 ϵ' 随温度的降低无明显改变;温度进一步下降后,各频点介电实部值 ϵ' 随温度降低而逐步减小,但不同温度区间递减幅度不一样;

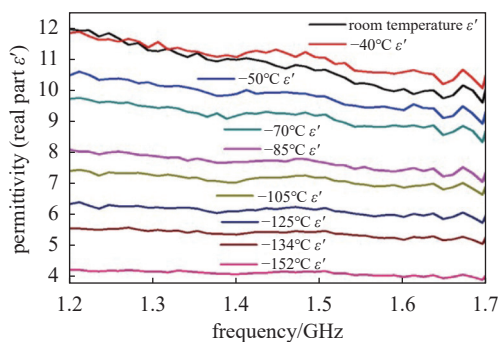


图6 碳泡沫吸波材料不同低温下的介电常数实部扫频曲线
Fig. 6 Sweep frequency curve of permittivity real part of carbon foam absorbing material at different low temperatures

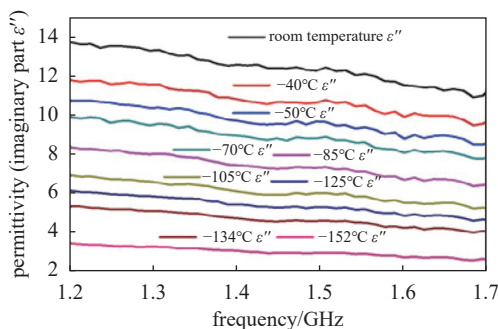


图7 碳泡沫吸波材料在不同低温下的介电常数虚部扫频曲线
Fig. 7 Sweep frequency curve of permittivity imaginary part of carbon foam absorbing material at different low temperatures

(3)从室温到-152℃低温,碳泡沫吸波材料在各频点的介电虚部值 ϵ'' 均随温度的降低而减小,整体降温过程中介电虚部值 ϵ'' 的减小幅度比介电实部值 ϵ' 的大,体现为整体降温过程中各频点介电损耗(ϵ''/ϵ')均随温度的降低而减小。

整体来看,从室温至-70℃区间,碳泡沫吸波材料的复介电常数和介电损耗降幅不大,仍可保持对

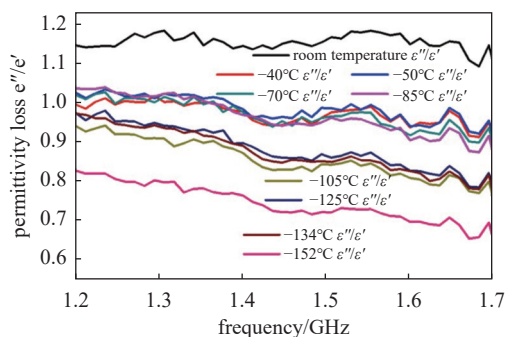


图8 碳泡沫吸波材料在不同低温下的介电损耗扫频曲线
Fig. 8 Sweep frequency curve of permittivity loss of carbon foam absorbing material at different low temperatures

电磁波的高损耗吸收能力;自-85℃继续降温,该吸波材料的复介电常数和介电损耗降幅较大,对电磁波的损耗吸收能力也大幅下降,但即使降温至-152℃,该吸波材料也仍具备一定的吸波能力。可基于碳泡沫吸波材料不同低温下的电磁参数,开展该材料在吸波箱中的进一步结构优化设计。

4 整体试验测试

采用双天线法测试吸波装置 PIM 性能。测试时,吸波热沉放置在环模设备容器内,2个馈源天线采用一个非金属板固定后放置于吸波装置内部,馈源的尖端距吸波装置的底部距离约为 500 mm,馈源的信号由高频电缆引出舱外,连接至测试设备上,如图 9 所示^[9]。

本次吸波材料的应用需求是:在试验规定频段范围内反射率 ≤ -25 dB,且在要求的功率模式下 PIM 电平指标小于-150 dBm。

真空低温环境下的测试结果表明,碳泡沫角锥及安装工艺能够满足真空环境下的使用要求,其内部角锥表面的温度可控,吸波热沉控温结果如图 10

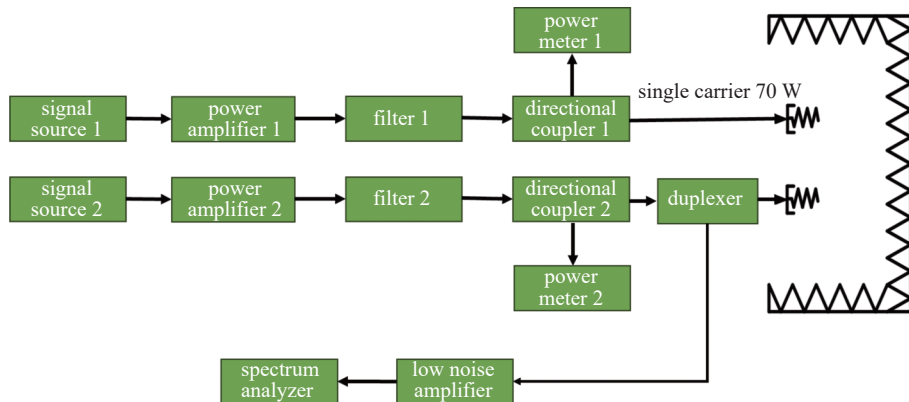


图9 小型吸波装置 PIM 测试原理图
Fig. 9 Schematic diagram of PIM test of small absorbing device

所示,可以看出吸波热沉内外温度趋势基本一致,高温平衡阶段,吸波热沉内部温度比外部高约 20℃。

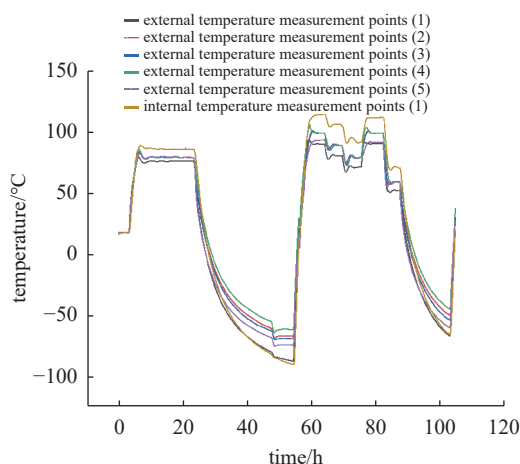


图10 吸波热沉控温结果

Fig. 10 Temperature control results of the absorbing heat sink

吸波热沉在真空低温环境下测试超过 50 h, 期间 PIM 电平测试装置一直开机检测, 检测结果如图 11 所示, 表明 -60℃~+90℃ 范围内的 PIM 电平优于 -150 dBm, 满足应用需求。

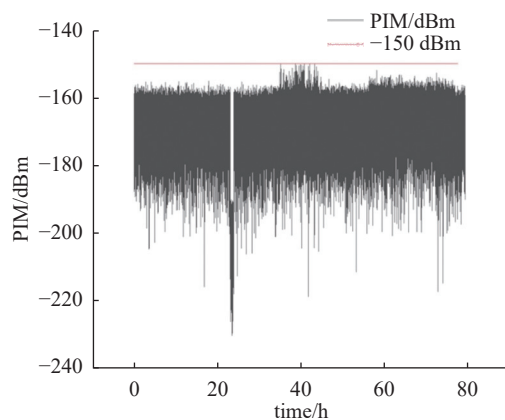


图11 测试过程中吸波热沉的 PIM 电平值

Fig. 11 PIM level values of the absorbing heat sink during the testing process

5 结论

本文以空间环境模拟器为真空环境平台,通过液氮制冷热沉和电加热片控温,采用波导法建立了吸波材料低温电磁性能测试系统,开展了碳泡沫吸波材料在真空低温环境下的电磁参数的测试,并厘清了该吸波材料在降温过程中的吸波性能变化规律,为未来吸波箱的进一步优化设计奠定基础。在此基础上,将进一步改进和完善吸波材料真空低温

电磁性能测试系统,全面系统开展不同空间用吸波材料在不同微波波段的低温电磁性能测试工作。

参 考 文 献

- [1] Luo F, Zhou W C, Jiao H, et al. Current study of high temperature radar absorbing materials[J]. *Aerospace Materials & Technology*, 2002, 32(1): 8-11 (罗发, 周万城, 焦桓, 等. 高温吸波材料研究现状 [J]. *宇航材料工艺*, 2002, 32(1): 8-11 (in Chinese))
- [2] Hu X S, Shen Y, Wang L M, et al. Study on the structure, properties and application of microwave absorbing materials[J]. *Applied Chemical Industry*, 2015, 44(9): 1741-1746 (胡小赛, 沈勇, 王黎明, 等. 吸波材料结构、性能及应用研究进展 [J]. *应用化工*, 2015, 44(9): 1741-1746 (in Chinese))
- [3] Liu D L, Liu P A, Yang Q S, et al. Research status and prospect of wave absorbing materials[J]. *Materials Reports*, 2013, 27(9): 74-78 (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(9): 74-78 (in Chinese))
- [4] Kang Y. The research progress of wave-absorbing materials[J]. *Jiangsu Ceramics*, 2011, 44(1): 1-5 (康永. 吸波材料的研究进展 [J]. *江苏陶瓷*, 2011, 44(1): 1-5 (in Chinese))
- [5] Chao Z M, Sun J H, He S, et al. The measurement methods for reflectivity of radar absorbing materials, GJB2038A-2011[S]. Beijing: Publishing and Distribution Department of Military Standards, General Armament Department, 2011: 1-6 (巢增明, 孙金海, 何山, 等. 雷达吸波材料反射率测试方法: GJB2038A-2011[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2011: 1-6)
- [6] Hu Y, Huang D Q, Shi Y Q, et al. Research progress of high temperature microwave-absorbing ceramic matrix composites[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2019, 39(5): 1-12 (胡悦, 黄大庆, 史有强, 等. 耐高温陶瓷基结构吸波复合材料研究进展 [J]. *航空材料学报*, 2019, 39(5): 1-12 (in Chinese))
- [7] 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 (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 (in Chinese))
- [8] Zhou W C, Wang J, Luo F, et al. Problems faced with high-temperature microwave absorbing materials[J]. *Materials China*, 2013, 32(8): 462-472 (周万城, 王婕, 罗发, 等. 高温吸波材料研究面临的问题 [J]. *中国材料进展*, 2013, 32(8): 462-472 (in Chinese))
- [9] Du C L, Qin J Y, Yin X F, et al. Development of low-PIM absorbing heat sink in microwave load[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2017, 34(4): 370-375 (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 (in Chinese))