

模拟空间服役环境下低温共烧陶瓷材料特性评价

徐美娟¹ 王平¹ 李岩² 何端鹏² 李姗泽¹ 杨士成¹
刘旭¹ 陈康³

(1 中国空间技术研究院西安分院, 西安 710100)

(2 中国空间技术研究院, 北京 100094)

(3 西安海众电子科技有限公司, 西安 710061)

文 摘 从航天器产品空间可靠性要求的角度出发,提出了低温共烧陶瓷(LTCC)材料在模拟空间服役环境下材料特性评价的方法,主要包括大温域、温度循环、辐照等试验的条件及试验后力/热性能及电性能评价方法,采用该方法对某国产LTCC材料进行了评价。结果表明,在大温域试验条件下,热导率从-65℃时的4.77 W/(m·K)下降到了175℃时的2.89 W/(m·K),弯曲强度从-65℃时的445 MPa下降到了0℃时的310 MPa并稳定在了310 MPa左右,热膨胀系数虽随温度的升高而增大,但随温度的变化趋势与同类进口材料基本一致,而在温度循环及模拟空间环境辐照试验条件下,各考核项目均变化不大,表明其性能基本可以满足宇航应用的可靠性要求,该研究成果可为LTCC材料的宇航应用提供技术指导。

关键词 空间服役环境,LTCC材料,宇航应用

中图分类号:V19

DOI:10.12044/j.issn.1007-2330.2023.02.013

Characteristics Evaluation of Low-temperature Co-fired Ceramic Substrate in Simulated Space Service Environment

XU Meijuan¹ WANG Ping¹ LI Yan² HE Duanpeng² LI Shanze¹
YANG Shicheng¹ LIU Xu¹ CHEN Kang³

(1 China Academy of Space Technology (Xi'an), Xi'an 710100)

(2 China Academy of Space Technology, Beijing 100094)

(3 Xi'an Haizhong Electronic Technology Co., LTD, Xi'an 710061)

Abstract From the perspective of space reliability requirements of spacecraft, a method for evaluating the material properties of low-temperature co-fired ceramic (LTCC) materials in a simulated space service environment was proposed in this paper, mainly including the conditions of large-temperature domain, temperature cycling, irradiation and the methods for evaluating the force/thermal and electrical properties after the tests. This method was carried out on a domestic LTCC material. The results show that the thermal conductivity decreases from 4.77 W/(m·K) at -65℃ to 2.89 W/(m·K) at 175℃, while the flexural strength decreases from 445 MPa at -65℃ to 310 MPa at 0℃ and stabilizes at about 310 MPa under the large-temperature test conditions. Although the coefficient of thermal expansion increases with the increase of temperature, the trend of change in temperature is basically consistent with similar imported materials. All the assessment items do not change significantly under the temperature cycling and simulated space environment irradiation test conditions, which indicates that the performance of the material can meet the reliability requirements of aerospace applications. According to the reserach results, technical guidance is provided for the aerospace application of LTCC substrate.

Key words Space service environment, LTCC substrate, Aerospace application

收稿日期:2022-09-25

第一作者简介:徐美娟,1987年出生,硕士,高级工程师,主要从事LTCC工艺技术的研究工作。E-mail:major_xmj@163.com

0 引言

低温共烧陶瓷(LTCC)技术是近年来航天领域的“新宠”,凭借其多层结构以及在微波性能、机械强度、热学特性等方面的独特优势,在航天产品小型化中发挥了越来越重要的作用。LTCC 瓷体是 LTCC 基板制造最重要的功能材料,直接决定了 LTCC 基板的电性能及应用

可靠性。国内航天器产品 LTCC 基板目前主要依赖进口材料,以 Dupont(杜邦)或 Ferro(福禄)公司的陶瓷材料应用最为广泛,这些材料在 20 世纪初已在海外完成了空间应用验证^[1-3],如图 1 所示。中国从 20 世纪初开始,采用已经过空间飞行验证的进口材料,进行有效载荷产品小型化的探索,并已取得了一定的成效^[4]。

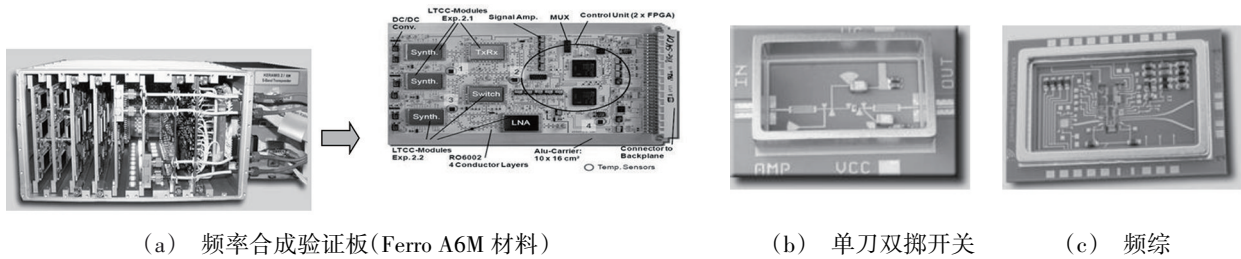


图 1 2012 年德国 TET-1 小卫星

Fig. 1 TET-1 small satellite of Germany in 2012

2018 年,中国电子科技集团 LTCC 基板制造工艺方面建立了标准体系,但在 LTCC 组装、检测、材料评价方面,目前国内外尚无统一标准。如何评价 LTCC 材料的特性能否满足宇航应用可靠性要求,国内外还皆是空白^[5]。因此,如何从航天产品空间可靠性的要求出发,获取 LTCC 材料在空间服役环境下的材料特性,以确保其在空间应用时稳妥可靠,对中国空间电子技术未来的发展至关重要。

本文针对航天器用 LTCC 材料空间应用可靠性考核无据可依的问题,从 LTCC 材料及其产品的应用过程及宇航应用可靠性要求的角度出发,提出一套航天器用 LTCC 材料模拟空间服役环境下的材料特性评价方法,并采用该方法,对一种国产 LTCC 材料进行评价,拟为国产 LTCC 材料的宇航应用奠定基础。

1 航天器产品空间应用可靠性要求

1.1 总体要求

微波模块是 LTCC 材料在宇航应用中的一类典型产品,其加工工艺过程为:通过制造加工工艺将 LTCC 材料及金属材料加工成 LTCC 基板后,进行焊接、粘接、键合等操作,组装成微波模块,其典型结构如图 2 所示,模块的主要功能是为航天器的微波信号传输与处理提供稳定的路径。

航天器产品的主要工作环境是地面上几千米高度的宇宙区域,主要空间环境的要素有:热循环、高真空、电离层等离子体、地球基本磁场、高能粒子辐射和空间碎片、流星体等^[6]。这就要求宇航用 LTCC 材料不仅需要具备良好的尺寸稳定性和厚度均匀性,该材料制作的 LTCC 基板还应具有良好的电性能批次一致性以保证模块性能的稳定,并兼具较好的机

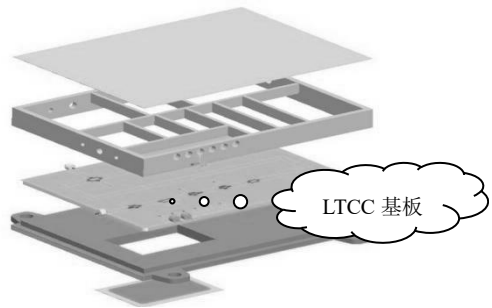


图 2 基于 LTCC 技术的微波模块典型结构

Fig. 2 Typical structure of microwave module based on LTCC technology

械性能以防止在装配、振动、高低温等状态及外力作用下基板出现破碎或者断裂。

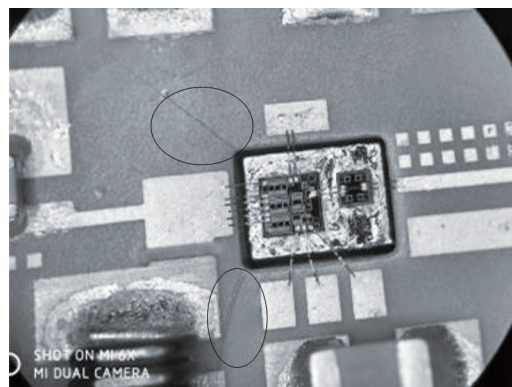


图 3 基板开裂

Fig. 3 Cracking of baseboard

因此,LTCC 材料在投入宇航应用之前,应对其在空间环境下的材料特性参数进行评价,以确保材料的适用性和可用性。从空间应用可靠性的要求出发,制定地面模拟空间服役环境试验方案,以确认在

空间环境条件下,该材料制作的LTCC基板性能能否满足在轨工作的性能及寿命需求。

考虑到航天器工作的环境,对LTCC基板特性影响比较大的因素是温度变化及辐照。在工作环境温度变化下,基板与壳体之间存在热失配,极端情况下可能导致基板开裂,如图3所示。同时,微波模块电路有一定的功耗,在服役温度下,基板的热导率需满足模块的散热需求。除此之外,电性能的稳定性同样重要,空间交变温度及辐照对电性能的影响同样需要考核。

通过考核空间应用条件下材料特性的变化,一方面可以甄别国产化LTCC材料能否满足宇航应用需求,另一方面其详细测试结果也可以成为星载LTCC产品

选材的依据,为LTCC材料的宇航应用提供指导。

1.2 模拟空间服役环境试验项目及方法

根据相关要求,LTCC材料模拟空间服役环境下材料特性评价的主要项目应包括大温域热性能试验、大温域力学性能试验、温度循环试验以及模拟空间环境辐照试验。其中,LTCC模块工作在整机内,在空间的工作温度不低于-55℃,不高于125℃。因此,为确保基板工作的安全性,且留有裕量,按GJB 548B—2004^[10]方法1010.1中的条件F开展温度循环试验,将大温域试验的温度范围定为-65~+175℃,将辐照总剂量定为 1×10^6 rad(Si)、 1×10^7 rad(Si),详细要求如表1所示。

表1 试验要求
Tab. 1 Test requirements

验证项目	检测项目	依据标准	试验条件
大温域热性能验证	热扩散率;比热容	GB/T 22588—2008 ^[7]	-65、0、25、50、100、150、175℃
	热膨胀系数	GB/T 4339—2008 ^[8]	-65~+175℃
大温域力学性能验证	三点弯曲强度	GB/T 6569—2006 ^[9]	-65~+175℃,温度点包括:-65、0、50、125、175℃
温度循环试验验证	ϵ_r ;tg δ	GB/T 12636—1990 ^[11]	高温175℃、低温-65℃,高低温下保温时间 ≥ 30 min,温度循环次数300次
	三点弯曲强度	GB/T 6569—2006 ^[9]	
模拟空间环境辐照试验验证	ϵ_r ;tg δ	GB/T 12636—1990 ^[11]	辐照总剂量分别为 1×10^6 rad(Si)、 1×10^7 rad(Si)
	热扩散率;比热容	GB/T 22588—2008 ^[7]	
	热膨胀系数	GB/T 4339—2008 ^[8]	

1.3 测试样件要求

在前述标准中,对样件的形状、尺寸均有一定的要求,而LTCC基板的加工能力有限,如矩形基板厚度应介于0.5~4 mm、异形基板厚度应介于0.5~3 mm等。将标准要求与LTCC基板工艺加工要求能力结合起来,确定了各测试项目的测试样件形状尺寸要求,如表2所示。

表2 样件要求
Tab. 2 Requirement of test specimen for service reliability

验证项目	检测项目	尺寸/mm
大温域热性能验证	热扩散率	$\Phi 10\times 1$
	比热容	$3\times 3\times (1\sim 2)$
	热膨胀系数	$5\times 25\times (2\sim 3)$
大温域力学性能验证	三点弯曲强度	$40\times 4\times 3$
温度循环试验验证	ϵ_r ;tg δ	$50\times 30\times (1\sim 1.5)$
	三点弯曲强度	$40\times 4\times 3$
模拟空间环境辐照试验验证	ϵ_r ;tg δ	$\Phi 6.48\times 3$
	热扩散率	$\Phi 10\times 1$
	比热容	$3\times 3\times (1\sim 2)$
	热膨胀系数	$5\times 25\times (2\sim 3)$

按照样件的要求,设计了图4所示的LTCC样件制备流程。因所涉及检测样件均无需制备电路图形,因此将样件制备的流程进行了最大程度的简化,即准确测定生瓷材料收缩率后,直接按收缩比例确定热切尺寸,通过下料及前处理、叠层、压合、压合体开腔、热切及共烧工序,快速完成测试样件的制作。按该方案制作的测试样件,其表面粗糙度 $< 0.8\ \mu\text{m}$,样件平面度 $< 30\ \mu\text{m}$,样件各方向尺寸精度优于 $\pm 0.1\ \text{mm}$,可以满足各项试验的要求。

制备的测试样件如图5所示。

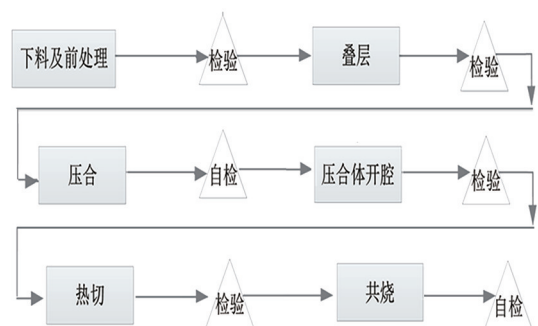


图4 样件制备流程

Fig. 4 Process flow of test specimen

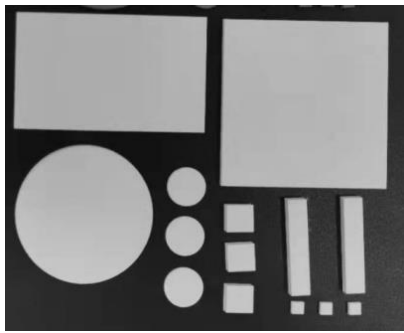


图5 测试样件

Fig. 5 Test specimen

2 测试结果分析

2.1 大温域热性能及机械性能

对大温域热导率、弯曲强度以及热膨胀系数进行测试,并根据测试结果绘制性能参数随温度变化的曲线。

2.1.1 大温域热导率

热导率、热扩散率、比热容和密度的基本关系如下:

$$\lambda = a \cdot c_p \cdot \rho \quad (1)$$

式中, λ 为热导率, a 为热扩散率, c_p 为比热容, ρ 为密度。

图6所示是比热容随温度变化的情况。可以看出,在 $-65 \sim +175 \text{ }^\circ\text{C}$,比热容不是一成不变的,而是会随着温度的升高而显著增大。在 $-65 \text{ }^\circ\text{C}$,比热容为 $0.54 \text{ J}/(\text{g}\cdot\text{K})$;温度升高到 $175 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,比热容上升到了 $0.92 \text{ J}/(\text{g}\cdot\text{K})$ 。

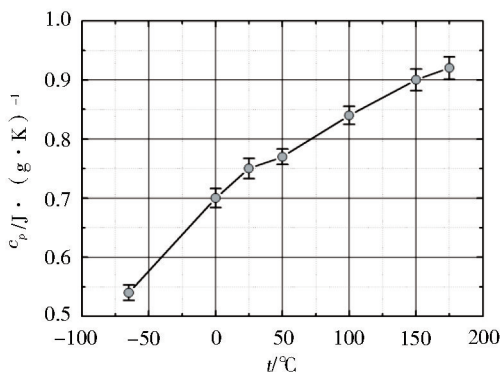


图6 比热容随温度变化情况

Fig. 6 The specific heat capacity varies with temperature

图7所示是热扩散率随温度变化的情况。可以看出,该材料的LTCC基板热扩散率随温度的升高而显著降低。 $-65 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,热扩散率为 $2.12 \text{ mm}^2/\text{s}$; $175 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,热扩散率降低到了 $1.21 \text{ mm}^2/\text{s}$ 。

按公式(1)对热导率进行计算,并绘制曲线图,结果如图8所示。可以看出,随着温度的升高,该材料LTCC基板的热导率呈下降趋势, $-65 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,热导率为 $4.77 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$;当温度上升到 $175 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,基板的热导率则下降为了 $2.89 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

这是因为烧结后的LTCC基板并不是致密的。

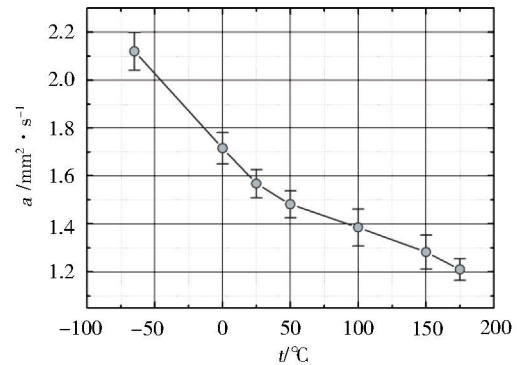


图7 热扩散率随温度变化情况

Fig. 7 The variation condition of thermal diffusivity with temperature

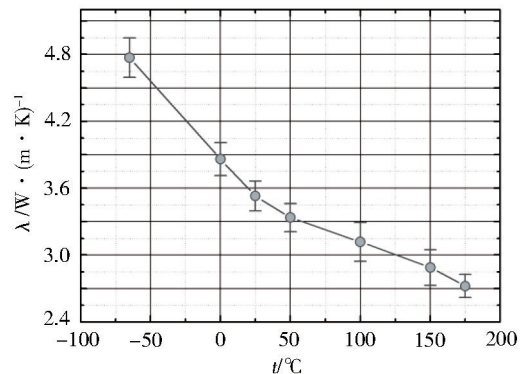


图8 热导率随温度变化情况

Fig. 8 The variation condition of the heat conductivity with temperature

不同材料的组分、致密度、孔隙率均有差异,因此不同材料热导率随温度呈现不同的变化规律。仅就该材料而言,在考核的温度范围内,其热导率大于行业要求的最低标准 $[2 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$,可以满足基本的应用需求。对于散热要求较高的产品,设计师可根据应用温度要求及该温度下热导率的实测结果,进行必要的结构优化,以加强散热。

2.1.2 弯曲强度

弯曲强度随温度的变化趋势如图9所示。

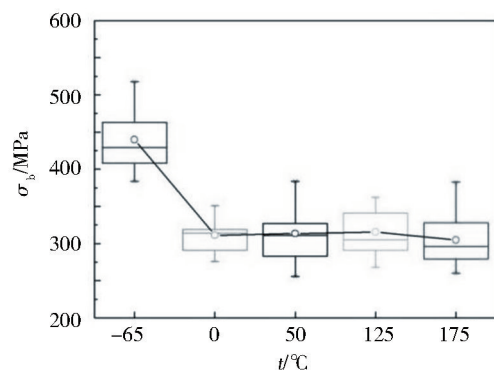


图9 不同温度下弯曲强度变化及分布情况

Fig. 9 Variation and distribution of flexural strength under different temperature

温度从-65℃上升到0℃时,基板的弯曲强度会有一个明显的下降,从-65℃时的445 MPa下降到了0℃时的310 MPa,随后趋于稳定,在0~175℃始终稳定在了310 MPa左右。

2.1.3 热膨胀系数

测量热膨胀系数时,将国产材料与进口材料热膨胀系数与温度的关系进行对比,结果如图10所示。可以看出,在考核的温度范围内,国产材料与进口材料的热膨胀系数相当,变化趋势也基本一致,同一温度下两者差异不超过 $0.2 \times 10^{-6}/K$ 。

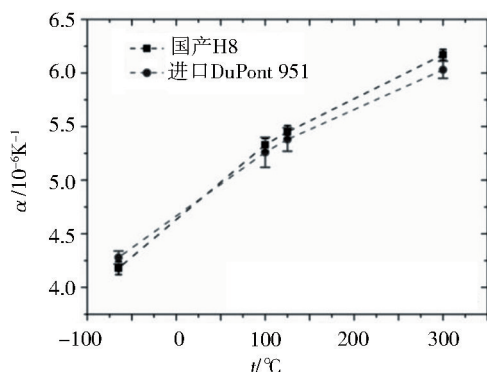


图10 平均热膨胀系数-温度关系

Fig. 10 The relationship between average coefficient of thermal expansion and temperature

2.2 温度循环试验验证

使用高低温冲击试验箱,试验条件设置为高温175℃、低温-65℃,高低温下保温时间30 min,高低温冲击次数300次。对温度循环后的国产材料在10 GHz频点处的介电常数及介质损耗进行了测试,结果如表3所示。可以看出,温度循环试验前后,国产材料介电常数及介质损耗变化幅度不大。表明在考核的温度范围内,该材料的电性能较为稳定。

表3 温度循环试验后介电常数及介质损耗(10 GHz频点处)

Tab. 3 Dielectric constant and dielectric loss after temperature cycling test (at 10 GHz)

试验前后	ϵ_r	$\text{tg}\delta$
温度循环前	7.88	0.0024
温度循环后	7.95	0.0021

2.3 模拟空间环境辐照试验验证

使用 ^{60}Co 辐照源,试验条件设置为:总剂量点设置包括: $1 \times 10^6 \text{ rad}(\text{Si})$ 、 $1 \times 10^7 \text{ rad}(\text{Si})$ 。试验后对各样件进行热导率、热膨胀系数、力学性能、介电性能检测。检测结果如表4所示。从表4中可以看出,辐照试验后,热导率、热膨胀系数、弯曲强度、介电常数及介质损耗均变化不大,说明该材料可以经受住空间辐照。

表4 辐照试验后材料性能

Tab. 4 Material properties after irradiation test

项目	$\lambda/W \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$	$\alpha/10^{-6} \text{K}^{-1}$	σ/MPa	ϵ_r	$\text{tg}\delta$
试验前	3.34	6.19	304	7.88	0.0024
试验后	3.34	6.18	307	7.79	0.0025
变化率/%	0	-0.16	0.98	-1.14	4.16

3 结论

根据宇航产品空间应用可靠性的要求,设计了一套宇航用LTCC材料模拟空间服役环境下的材料特性评价方法。该方法充分考虑了宇航产品的服役环境,提出了一套在地面检测LTCC材料空间应用时各项性能指标的样件制备及测试要求,测试项目主要包括大温域下热性能、力学性能;温度循环后热性能及电性能的变化情况;辐照试验后的热性能、电性能及力学性能的变化情况。测试结果一方面可以作为评价LTCC材料能否适应宇航应用的直接依据,同时也可以为航天器产品的可靠设计提供最准确的原始数据。

采用该方法,对某国产材料在模拟空间服役环境条件下的材料特性进行了评价,评价结果表明:

(1)在大温域试验条件下,热导率有较大的波动,从-65℃时的 $4.77 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 下降到了175℃时的 $2.89 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$;弯曲强度从-65℃时的445 MPa下降到了0℃时的310 MPa,并稳定在310 MPa左右;热膨胀系数虽随温度的升高而增大,但随温度的变化趋势与同类进口材料基本一致。

(2)在温度循环及模拟空间环境辐照试验条件下,各考核项目均变化不大。

该材料的各项性能在模拟空间服役环境之下依然可以满足技术指标要求,可以满足宇航应用的可靠性要求。

参考文献

- [1] ANTONIO F, ALESSANDRO D C. Thermally efficient, X-band 3D T/R module with calibration capability for space radar [J]. IEEE Access, 2018, 6(11): 60921-60929.
- [2] HACKENBERG U. The terrasar-X TR-module [C]// Proc. 5th EUR. Conf. On Synthetic Aperture Radar, IEEE ACCESS, 2004: 477-480.
- [3] STANGL M, WERNINGHAUS R. Terra SAR-X technologies and first results [J]. IEE Proc. -Radar Sonar Navig, 2006, 153(2): 198-201.
- [4] YANG S, SHI W. Circulator integrated in LTCC with screen printed cofiring ferrite for space application [C]// International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), 2018, 206(11): 264-270.
- [5] 何中伟, 王晓卫, 李冉, 等. LTCC生瓷带基本性能检测

方法研究[J]. 中国电子科学研究院学报,2021,16(5):451-458.

HE Z W, WANG X W, LI R, et al. Checkup method mtudy of the basic characteristics of LTCC green tape [J]. Journal of China Electronics Research Institute, 2021, 16(5):451-458.

[6] 李涛,易忠,高鸿. 航天器材料空间环境适应性评价技术[J]. 装备环境工程,2012,9(3):37-40.

LI T, YI Z, GAO H. Summarization space environmental worthiness evaluation technology for spacecraft material [J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(3):37-40.

[7] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 闪光法测量热扩散率或热导率: GB/T 22588—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. Determination of thermal diffusivity or thermal conductivity by the flash method: GB/T 22588—2008[S]. Beijing: China Standard Publishing House, 2008.

[8] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会. 金属材料热膨胀特征参数的测定: GB/T 4339—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. Test methods for thermal expansion characteristic parameters of metallic materials: GB/T 4339—2008 [S]. Beijing: China Standard Publishing House, 2008.

[9] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 精细陶瓷弯曲强度试验方法: GB/T 6569—2006[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. Test Method for Flexural Strength of Monolithic Ceramics at Room Temperature: GB/T 6569—2006[S]. Beijing: China Standard Publishing House, 2008.

[10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 微电子器件试验方法和程序: GJB 548B—2005[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. Test methods and procedures for microelectronic devices: GJB 548B—2005 [S]. Beijing: China Standard Publishing House, 2005.

[11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 微波介质基片复介电常数带状线测试方法: GB/T 12636—1990[S]. 北京: 中国标准出版社, 1990.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. Stripline test method for complex permittivity of microwave dielectric substrates: GB/T 12636—1990 [S]. Beijing: China Standard Publishing House, 1990.