

ICS 点击此处添加 ICS 号

CCS 点击此处添加 CCS 号

T/CASME

团 体 标 准

T/CASME XXXX—XXXX

陶瓷基透波复合材料性能要求及测试方法

Performance requirements and test methods of ceramic-based transmission composite materials

（征求意见稿）

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX—XX—XX 发布

XXXX—XX—XX 实施

中国中小商业企业协会 发 布

目 次

前言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 材料性能要求 2

5 测试方法 3

6 试验设备 8

7 存储与运输要求 9

8 质量控制与检测 10

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由××××提出。

本文件由中国中小商业企业协会归口。

本文件起草单位：××××、××××、××××。

本文件主要起草人：××××、××××、××××。

陶瓷基透波复合材料性能要求及测试方法

1 范围

本文件规定了陶瓷基透波复合材料的性能要求、测试方法、试验设备、储存与运输要求、质量控制与检测要求。

本文件适用于以二氧化硅(SiO_2)、氧化铝(Al_2O_3)、氮化硅(Si_3N_4)、碳化硅(SiC)等为基体,通过烧结、热压、溶胶-凝胶\化学气相渗透(CVI)或先驱体浸渍裂解(PIP)工艺制备的透波复合材料,主要应用于航空航天飞行器天线罩、雷达窗口、高温通信设备透波部件、军事装备电磁窗口等领域。本标准覆盖材料研发、生产、检测、储存、运输及服役全生命周期管理,旨在确保材料在极端环境(高超声速/高热流/强腐蚀)下的力学性能、电气性能及环境适应性的稳定性与功能可靠性。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件;不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 1409-2006 测量电气绝缘材料在工频、音频、高频(包括米波波长在内)下电容率和介质损耗因数的推荐方法

GB/T 2423.3-2016 环境试验 第2部分:试验方法 试验Cab:恒定湿热试验

GB/T 3075-2021 金属材料 疲劳试验 轴向力控制方法

GB/T 3354-2014 定向纤维增强聚合物基复合材料拉伸性能试验方法

GB/T 4340.1-2024 金属材料 维氏硬度试验 第1部分:试验方法

GB/T 4740-2024 陶瓷材料强度试验方法

GB/T 5594.4-2015 电子元器件结构陶瓷材料性能测试方法 第4部分:介电常数和介质损耗角正切值的测试方法

GB/T 6569-2006 精细陶瓷弯曲强度试验方法

GB/T 7320-2018 耐火材料 热膨胀系数试验方法

GB/T 10125-2021 人造气氛腐蚀试验 盐雾试验

GB/T 12636-1990 微波介质基片复介电常数带状线 测试方法

GB/T 13303-1991 钢的抗氧化性能测定方法

GB/T 14733.10-2024 电信术语 天线

GB/T 16422.2-2022 塑料 实验室光源暴露试验方法 第2部分:氙弧灯

GB/T 16825.1-2022 金属材料 静力单轴试验机的检验与校准 第1部分:拉力和(或)压力试验机

测力系统的检验与校准

GB/T 22588-2008 闪光法测量热扩散系数或导热系数

GB/T 23805-2009 精细陶瓷室温拉伸强度试验方法

GB/T 23806-2009 精细陶瓷断裂韧性试验方法 单边预裂纹梁(SEPB)法

GB/T 31290-2022 碳纤维 单丝拉伸性能的测定

GB/T 38515-2020 石英纤维织物增强树脂基复合材料高温力学性能试验方法

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

陶瓷基透波复合材料 ceramic-based wave-transmitting composites

以二氧化硅(SiO_2)、氧化铝(Al_2O_3)、氮化硅(Si_3N_4)、碳化硅(SiC)等低介电损耗陶瓷为基体,通过引入绝缘增强相(如石英纤维、氧化铝纤维)或构建可控孔隙结构,实现介电常数与力学性能的协同优化,满足透波-承载一体化功能需求的关键材料。

3.2

透波率 wave transmittance

透波率为电磁波垂直入射($0^\circ \pm 2^\circ$)时,透过标准厚度(3 ± 0.1) mm材料的功率与入射功率的百分比。

3.3

介电常数 dielectric constant

在标准环境($23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, $50\%\text{RH} \pm 5\%\text{RH}$)下,表征材料在电场作用下存储电能能力的物理量。

3.4

损耗因子 loss tangent

表征材料在电磁场中能量损耗能力的物理量,定义为介电损耗角的正切值,即复介电常数虚部与实部的比值。

3.5

编织结构复合材料 braided structural composites

通过二维/三维编织绝缘纤维增强体(如石英纤维、氧化铝纤维)与陶瓷基体复合制备而成的材料。

4 材料性能要求

4.1 机械性能

4.1.1 抗压强度

常规透波部件(如低速无人机天线罩)的抗压强度应不低于80 MPa;高超声速部件(不小于10 Ma)需满足常温不小于300 MPa且1200 $^\circ\text{C}$ 高温原位抗压强度(氮气保护,保载30 min)不大于180 MPa,强度衰减率不大于40%。

4.1.2 弯曲强度

通用场景(如地面雷达窗口)的弯曲强度要求不小于60 MPa;高机动飞行器部件(如导弹整流罩)需满足:常温弯曲强度不小于200 MPa,800 $^\circ\text{C}$ 高温弯曲强度(空气/惰性气氛)衰减率不大于10%(相对常温值)。

4.1.3 拉伸强度

适用于薄壁透波结构(如卫星通信窗口)的拉伸强度标准值不小于28 MPa;若材料采用编织增强结构(如石英纤维三维编织),需同步满足面内拉伸强度不小于50 MPa和层间结合强度不小于15 MPa,确保各向力学性能均衡。

4.1.4 编织结构复合材料要求

编织结构的层间剪切强度应不小于10 MPa,孔隙率不大于5%;应用于高速烧蚀环境(如10马赫导弹头罩)时,需通过氧乙炔烧蚀试验(热流不小于2.4 MW/m²),烧蚀率不大于0.1 mm/s,且烧蚀后表面无分层或裂纹,孔隙率不大于8%(允许隔热微孔)。

4.1.5 维氏硬度与断裂韧性

维氏硬度需不小于15 GPa,断裂韧性不小于4 MPa $\cdot\text{m}^{1/2}$,编织结构试样需标注纤维取向,确保切口方向与主承载方向垂直。

4.2 电气性能

4.2.1 透波率

垂直入射 ($0^\circ \pm 2^\circ$) 时, 试样在 1 GHz~18 GHz 频段透波率不小于 85%, 18 GHz~40 GHz 频段不小于 80%; 斜入射 (30° 、 45° 、 60°) 时, TE/TM 模式透波率不小于 75% (1 GHz~18 GHz)、不小于 70% (18 GHz~40 GHz)。

4.2.2 介电常数

低频段 (不大于 1 GHz) 和高频段 (不小于 10 GHz) 分别采用对应测试方法, 所有测试应在标准环境 ($23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$, $50\%\text{RH} \pm 5\%\text{RH}$) 下进行, 高温场景应提供 $25^\circ\text{C} \sim 800^\circ\text{C}$ 范围内的介电常数温度系数 (TCC) 数据。

4.2.3 损耗因子

采用谐振腔法或矢量网络分析法, 通过测量介电常数的实部 (ε') 和虚部 (ε'') 来计算 $\tan \delta$ 值 ($\tan \delta = \varepsilon'' / \varepsilon'$)。高温环境下的损耗特性测试应特别注明温度条件, 并提供温度变化曲线。

4.3 热性能

4.3.1 热膨胀系数

室温至 800°C 范围内的平均热膨胀系数应不大于 $5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, 测试在空气环境中进行, 升温速率 $5^\circ\text{C}/\text{min}$ 。

4.3.2 热导率

25°C 时热导率应不小于 $20 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$, 确保高温环境下的散热性能, 各向异性材料需测试不同方向的热导率。

4.3.3 热稳定性

在空气环境中进行, $800^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ 下保温 2 小时, 质量损失率不大于 0.5%。试样应经 105°C 预处理以消除吸附水影响。测试应使用精度不小于 0.1 mg 的天平, 并记录试样表面状态 (裂纹/剥落情况)。

4.3.4 高温氧化性

在空气环境中进行, $1200^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ 下暴露 100 小时, 质量损失率不大于 0.2%。试样应放置于氧化铝坩埚中, 避免与炉膛直接接触, 冷却后应用乙醇清洗表面松散氧化层后再称重。

4.4 环境适应性

4.4.1 湿热试验

在 $85^\circ\text{C}/85\%\text{RH}$ 环境放置 240 小时, 透波率下降 (1 GHz~40 GHz 垂直入射) 不大于 3%, 表面无分层、裂纹。

4.4.2 盐雾试验

在 $35^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ 的专用盐雾箱内进行, 使用 $5\% \pm 1\%$ NaCl 溶液连续喷雾 48 小时, 盐雾沉降量为 $1 \text{ mL}/(\text{h} \cdot 80 \text{ cm}^2) \sim 2 \text{ mL}/(\text{h} \cdot 80 \text{ cm}^2)$ 。试验后材料表面腐蚀面积不得超过 0.1%, 且不得出现基体腐蚀或纤维裸露。

4.4.3 紫外线老化

采用 UVA-340 灯管, 在 $60^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$ 箱体下进行, 累计辐照量达到 $1000 \text{ kWh}/\text{m}^2$ 后评估颜色变化 ΔE 不大于 3。颜色变化反映材料表面化学结构变化 (如聚合物基体降解、陶瓷表面氧化等), 通过 CIE Lab 色差仪测量。

4.4.4 高温环境适应性

材料在 300°C 空气环境中保持 100 小时后, 透波率变化不大于 $\pm 2\%$, 机械强度衰减不大于 5%, 透波率变化不大于 $\pm 2\%$ 。

4.4.5 温度循环试验

-55℃(30 min)至125℃(30 min)循环20次,转换时间不大于10分钟,湿度不大于30%RH。试验后材料不允许出现开裂、分层或界面脱粘,透波率变化不大于1.5%。

4.5 长期稳定性

4.5.1 疲劳寿命

需在室温和高温两种环境下进行,室温(25℃±2℃)条件下循环加载次数应不小于10⁶次,强度衰减不小于10%;高温(800℃±5℃)条件下,氧化物陶瓷基材料允许衰减不大于12%,非氧化物陶瓷基材料(如SiC/Si₃N₄)允许衰减不大于15%。

4.5.2 高温氧化

氧化物陶瓷基(如Al₂O₃/SiO₂)在空气环境1200℃±5℃下暴露100小时,质量损失率不大于0.2%;非氧化物陶瓷基(如SiC/Si₃N₄)因易氧化,测试温度降为1200℃±5℃,惰性气氛保护保温100 h,质量损失率不大于0.3%。

4.5.3 高温蠕变

SiC基材料在1400℃氮气环境(防止氧化)、Si₃N₄基在1200℃空气环境中,施加恒定载荷50 MPa持续100小时,要求蠕变应变不大于0.2%。

4.5.4 环境应力开裂

试样置于85℃/85%RH环境中,持续施加弯曲应力(极限强度的50%)500小时。所有材料表面裂纹扩展不大于100 μm。

5 测试方法

5.1 机械性能

5.1.1 抗压强度

按GB/T 4740-2024执行,采用尺寸为10 mm×10 mm×20 mm的长方体试样。在室温(23℃±2℃)空气中,以1 mm/min的加载速率进行测试。高温测试时,氧化物基材料在空气环境中测试(不大于1200℃),非氧化物基材料在氮气保护的高温炉内原位加载(不大于800℃),升温速率3℃/min,保温30 min后测试。每组有效试样不少于5个,剔除偏差大于±15%数据后取均值。抗压强度按公式(1)计算:

$$\sigma = \frac{F}{A} \dots\dots\dots (1)$$

式中:

- σ——抗压强度,单位为兆帕(MPa);
- F——破坏载荷,单位为牛(N);
- A——受压面积,单位为平方毫米(mm²)。

5.1.2 弯曲强度

按GB/T 6569-2006的规定执行,试样尺寸为36 mm×4 mm×3 mm,三点弯曲跨距40 mm,加载速率0.5 mm/min。高温测试时,氧化物基材料在空气中测试(不大于800℃),非氧化物基材料在氮气保护炉内原位加载。每组试样不少于5个,断裂起始点需距接触点大于2 mm(跨距5%)方有效。弯曲强度(σ)按公式(2)计算:

$$\sigma = \frac{3PL}{2BH^2} \dots\dots\dots (1)$$

式中:

- σ——弯曲强度,单位为兆帕(MPa);
- P——断裂载荷,单位为牛(N);
- L——跨距,单位为毫米(mm);

- B ——试样宽度,单位为毫米 (mm);
 H ——试样高度,单位为毫米 (mm)。

5.1.3 拉伸强度

5.1.3.1 应符合 GB/T 23805-2009 的要求,试样采用标距段尺寸为 $25\text{ mm} \times 4\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 的哑铃型结构,夹持端过渡半径不小于 10 mm 以消除应力集中。测试环境控制在室温 ($23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$),加载速率 0.5 mm/min (脆性材料)或 2 mm/min (韧性材料),相对湿度 $50\%\text{RH} \pm 5\%\text{RH}$ 。

5.1.3.2 对于编织增强结构材料,面内拉伸性能测试参照 GB/T 3354-2014,要求面内拉伸强度不小于 80 MPa (经向/纬向),层间结合强度不小于 25 MPa (采用改良双悬臂梁法)。高温测试时,需结合 GB/T 38515-2020 评估材料在热环境下的力学性能退化行为。

5.1.3.3 高温测试阶段,氧化物陶瓷基材料需在空气氛围中于 600°C 条件下进行,非氧化物陶瓷基材料则应在氮气保护氛围中维持 800°C 测试环境,保温时间不低于 60 min 以确保温度均匀。拉伸强度按公式 (3) 计算:

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (1)$$

式中:

- σ ——材料的拉伸强度,单位为兆帕 (MPa);
 F ——材料试件受到的最大轴向拉力值,单位为牛 (N);
 S ——材料试件受拉界面的面积,单位为平方毫米 (mm^2)。

5.1.4 维氏硬度

按 GB/T 4340.1-2024 的规定,使用 147.1 N 载荷,保压时间 15 s 。测试应避免纤维编织交界处,每个试样至少测量 5 个有效压痕,压痕对角线测量精度要求达到 $\pm 0.5\text{ }\mu\text{m}$ 。测试环境为室温空气,试样表面粗糙度 R 不大于 $0.8\text{ }\mu\text{m}$,并剔除压痕形状不规则度 (如对角线长度差大于 10%) 或压痕边缘出现裂纹。维氏硬度值按公式 (4) 计算:

$$HV = \frac{1.8544F}{D^2} \quad (1)$$

式中:

- HV ——维氏硬度,单位为吉帕斯卡 (GPa);
 F ——施加的内压力,单位为牛 (N);
 D ——压痕两条对角线的平均长度,单位为毫米 (mm)。

5.1.5 断裂韧性

按 GB/T 23806-2009 的要求,采用单边切口梁 (SENB) 试样,尺寸为 $(25.0\text{ mm} \times 5.00\text{ mm} \times 2.50\text{ mm}) \pm 0.02\text{ mm}$,切口深度 $1.25\text{ mm} \pm 0.05\text{ mm}$ (金刚石线切割制备,尖端半径不大于 $15\text{ }\mu\text{m}$)。氧化物陶瓷基材料在空气环境中测试,非氧化物陶瓷基材料则需在氮气保护环境 (氧含量不大于 50 ppm) 中进行。测试以 0.05 mm/min 准静态加载速率进行,每组至少 5 个有效试样 (剔除断裂面偏离切口平面大于 10° 的数据),试样制备需保证切口根部 R 不大于 $5\text{ }\mu\text{m}$,测试前后用标准参考材料校验设备 (误差不大于 $\pm 2\%$),完整记录载荷-位移曲线直至断裂。断裂韧性 (K_{IC}) 按公式 (5) 计算:

$$K_{IC} = Y \frac{3PL}{2bw^2} \sqrt{a} \quad (1)$$

式中:

- K_{IC} ——断裂韧性,单位为兆帕的平方根 ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$);
 L ——跨距,单位为毫米 (mm);
 a ——裂纹长度,单位为毫米 (mm);
 b ——试样宽度,单位为毫米 (mm);
 w ——试样高度,单位为毫米 (mm);
 P ——施加应力,单位为牛 (N);
 Y ——无量纲几何形状因子,是裂纹长度 a 与试样高度 w 之比 (a/w) 的函数。

5.2 电气性能

5.2.1 透波率远场测试

5.2.1.1 参照 GJB 2038A-2011 的规定执行,采用远场测试法。标准试样尺寸为 $300\text{ mm} \times 300\text{ mm} \times (3.0 \pm 0.1)\text{ mm}$,测试在微波暗室中进行,收发天线距离不小于 5 m ,使用矢量网络分析仪在 $1\text{ GHz} \sim 40\text{ GHz}$ 频率范围内扫描测试,重点频段采用不同步长: $1\text{ GHz} \sim 2\text{ GHz}$ (0.1 GHz)、 $2\text{ GHz} \sim 18\text{ GHz}$ (0.5 GHz)、 $18\text{ GHz} \sim 40\text{ GHz}$ (1 GHz)。测试环境控制在 $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$,湿度 $50\%\text{ RH} \pm 5\%\text{ RH}$,每个频点重复测试 3 次取平均值。高温测试应采用专用耐高温夹具,最高测试温度 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$,非氧化物材料需在氮气保护下进行 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 测试,消除氧化影响,升温速率 $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。透波率按公式 (6) 计算。若以 dB 为单位表示,则透波率的计算按公式 (7) 计算:

$$T = \frac{P_t}{P_i} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

T ——透波率;

P_t ——透射功率,单位为瓦 (W);

P_i ——入射功率,单位为瓦 (W)。

$$T = 10 \lg \frac{P_t}{P_i} \quad (2)$$

式中:

T ——透波率;

P_t ——透射功率,单位为瓦 (W);

P_i ——入射功率,单位为瓦 (W)。

5.2.1.2 对于实际应用中的斜入射情况(如雷达罩),应额外测试 30° 、 45° 和 60° 入射角下的透波性能,并分别记录横电极化(TE)和横磁极化(TM)模式的数据。测试应采用矢量网络分析仪(如 Keysight N5224B),试样尺寸为 $150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times (3.0 \pm 0.1)\text{ mm}$,测试前应进行系统校准并采取有效措施消除边缘散射的影响。其中,TE 波电场垂直入射面,TM 波电场平行入射面。

5.2.2 介电常数

按 GB/T 12636-1990 的要求执行,试样尺寸根据频段严格区分:低频段 ($1\text{ MHz} \sim 1\text{ GHz}$) 采用直径 $50.0\text{ mm} \pm 0.1\text{ mm}$ 、厚度 $2.0\text{ mm} \pm 0.1\text{ mm}$ 圆片试样,高频段 ($1\text{ GHz} \sim 40\text{ GHz}$) 采用直径 $22.86\text{ mm} \pm 0.02\text{ mm}$ 标准波导尺寸圆柱试样。测试频点包括 1 MHz 、 10 MHz 、 1 GHz (平行板电容法) 和 1 GHz 、 2 GHz 、 5 GHz 、 10 GHz 、 20 GHz 和 40 GHz (谐振腔法)。

5.2.3 损耗因子

损耗因子 $\tan \delta$ 通过介电常数虚部与实部的比值计算。重点测试频点为 10 GHz ,要求测试系统动态范围不小于 110 dB ,温度控制精度 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。对于高温测试,非氧化物陶瓷基材料需在氮气环境中进行(最高 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$)。测试时需记录频率-损耗特性曲线,每个条件至少重复 3 次测量,数据偏差超过 $\pm 5\%$ 应重新校准系统。

5.3 热性能

5.3.1 热膨胀系数

按 GB/T 7320-2018 的要求,热膨胀系数测试在空气环境中进行,试样尺寸为 $25\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$,升温速率为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$;其中氧化物陶瓷基材料的测试温度范围为室温 $\sim 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$,非氧化物陶瓷基材料则为室温 $\sim 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$,惰性气氛保护。测试数据需取 3 次测量的平均值,若 3 次测量结果的偏差超过 $\pm 5\%$,应重新进行测试。热膨胀系数按公式 (8) 计算:

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L_0 \Delta T} \quad (1)$$

式中:

α ——热膨胀系数,单位为每摄氏度 ($1/^{\circ}\text{C}$);

ΔL ——长度变化量,单位为毫米 (mm);

L_0 ——初始长度,单位为毫米 (mm);

ΔT ——温度变化范围，单位为摄氏度（℃）。

5.3.2 热导率

按GB/T 22588-2008的规定，测试在标准大气环境（23℃±2℃）下进行，氧化物陶瓷基材料与非氧化物陶瓷基材料均采用直径12.7mm、厚度2mm~4mm的圆片试样，测试前均需用熔融石英（ $\lambda \approx 1.4 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ）或不锈钢 [$\lambda \approx 15 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$] 校准系统，确保测量误差不大于±3%；其中氧化物陶瓷基材料测试温度范围可覆盖室温至1200℃，非氧化物陶瓷基材料因在空气中高温易氧化，测试温度范围通常限定在室温至800℃。两种材料测试均需记录热扩散系数随温度的变化曲线，并根据密度和比热容计算导热系数，数据取3次平行测试的平均值，偏差超过±5%时需重新测试。复合材料的热导率按公式（9）计算：

$$\lambda = \alpha \times C_p \times \rho \quad (1)$$

式中：

λ ——热导率，单位为瓦每米每开[W/(m·K)]；

α ——热扩散系数，单位为每秒平方米（m²/s）；

C_p ——定压比热，单位为焦耳每千克每开尔文[J/(kg·K)]；

ρ ——密度，单位为千克每立方厘米（kg/cm³）。

5.3.3 热稳定性试验

试样经105℃烘干2小时去除吸附水，在空气环境中于800℃±5℃下保温2小时，使用精度不低于0.1mg天平称重，质量损失率不大于0.5%。表面状态需拍照记录并定量描述裂纹/剥落区域。

5.3.4 高温氧化试验

按GB/T 13303-1991的规定，氧化物陶瓷基材料在空气环境中进行测试，温度为1200℃±5℃，持续时间100小时；非氧化物陶瓷基材料则在1200℃±5℃的空气环境中持续100小时测试。测试时，试样应置于氧化铝坩埚内，试验结束冷却后，用乙醇超声清洗以去除表面松散氧化层，随后使用精度为0.01mg的天平称重，通过重量变化评估材料的抗氧化性能。测量质量损失率按公式（10）计算：

$$\Delta m = \frac{m_0 - m_1}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中：

Δm ——失重量；

m_0 ——样品干燥前的质量，单位为克（g）；

m_1 ——样品干燥后的质量，单位为克（g）。

5.4 环境适应性

5.4.1 湿热试验

按GB/T 2423.3-2016的要求，湿热试验在恒温恒湿箱中进行，环境条件严格控制在温度85℃±2℃、相对湿度85%RH±5%RH，持续时间240小时。测试前，试样需在标准环境（23℃±2℃，50%RH±5%RH）下平衡48小时；试验后立即复测透波率，要求透波率下降不大于3%。表面状态检查使用20倍放大镜观察，试样不得出现分层、裂纹或起泡等缺陷，裂纹长度大于等于0.5mm为失效。试验过程中，试验箱内空气流速应保持在0.5m/s~1.5m/s，以确保湿度均匀性，该试验条件可模拟热带海洋气候环境对材料的影响。

5.4.2 盐雾试验

按GB/T 10125-2021执行，在密闭试验箱内持续喷雾48小时，使用5.0%±0.1%NaCl溶液，pH值调节至6.5~7.2（35℃时）。箱内温度维持在35℃±2℃，盐雾沉降量为1.0mL/(h·80cm²)~2.0mL/(h·80cm²)。试样放置角度为20°±5°，试验后先用去离子水冲洗，再在40℃烘箱中干燥2小时。腐蚀面积评定采用图像分析法（分辨率不低于500万像素），要求腐蚀面积不大于0.1%且无基体腐蚀。不锈钢参比样的腐蚀率应控制在1.0mg/(dm²·d)~2.0mg/(dm²·d)范围内验证试验有效性。

5.4.3 太阳辐射试验

参照IEC 60068-2-5:2018（太阳辐射试验）执行：采用氙灯辐射源，光谱范围290 nm~2500 nm，辐照度 0.55 W/m^2 （在340 nm处）。黑板温度控制在 $60^\circ\text{C} \pm 3^\circ\text{C}$ ，相对湿度 $50\% \pm 5\%$ ，连续照射1000小时。试验后颜色变化 ΔE 不大于3（CIE Lab色差法，测量孔径8 mm），透波率变化不大于2%。累计1500小时或按设备要求更换一次滤光片，辐射强度校准采用NIST溯源的标准辐射计，确保光谱匹配度不小于85%。

5.4.4 高温高湿试验

温度 $85^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ 、相对湿度 $85\% \text{ RH} \pm 5\% \text{ RH}$ ，持续时间1000小时。试样安装时应避免接触金属夹具（使用PTFE支架），每240小时取出按5.1.2方法测试弯曲强度，要求强度衰减不高于8%。该试验模拟电子设备舱内极端环境，试验后还应按5.2.1和5.3.4进行透波率测试和高温氧化试验的对比验证。

5.5 长期稳定性

5.5.1 高温疲劳性能测试

5.5.1.1 按GB/T 3075-2021的相关规范，氧化物陶瓷基材料在空气环境中进行三点弯曲疲劳试验，测试温度为 $800^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ ；非氧化物陶瓷基材料则在纯度不低于99.999%的氮气环境中测试，温度为 $600^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ 。试验应力比 $R=0.1$ ，频率55 Hz，循环次数 10^6 次，试验后要求氧化物陶瓷基材料强度衰减不高于10%，非氧化物陶瓷基材料强度衰减不高于15%。

5.5.1.2 采用高频疲劳试验机，对试样施加循环载荷（幅值为极限强度的60%），频率1 Hz~100 Hz，记录 10^6 次循环后的剩余强度。强度衰减率按以下公式（11）计算：

$$\Delta\sigma = \frac{\sigma_0 - \sigma_1}{\sigma_0} \times 100\% \quad (11)$$

式中：

- σ_0 ——初始弯曲强度，单位为兆帕（MPa）；
- σ_1 ——试验后剩余强度，单位为兆帕（MPa）。

5.5.2 高温氧化后力学性能测试

氧化物陶瓷基在空气环境 1200°C 保持100小时；非氧化物陶瓷基在空气环境 1200°C 保持100小时。处理后试样按5.1.2测试弯曲强度，要求氧化物基材料 η 不小于90%，非氧化物基材料 η 不小于85%。测试前应用金刚石磨头对试样表面进行轻抛光（抛光深度不大于 $5 \mu\text{m}$ ），测试环境控制在 $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ 、 $50\% \text{ RH} \pm 5\% \text{ RH}$ 。强度保持率按公式（12）计算：

$$\eta = \frac{\sigma_1}{\sigma_0} \quad (12)$$

式中：

- η ——强度保持率；
- σ_0 ——初始弯曲强度，单位为兆帕（MPa）；
- σ_1 ——试验后剩余强度，单位为兆帕（MPa）。

5.5.3 高温蠕变测试

氧化物陶瓷基材料在空气环境中测试温度为 1000°C ，非氧化物陶瓷基材料在氮气环境中测试温度为 1200°C ，施加应力不大于10%极限强度。测试持续500小时，每10分钟记录一次数据，最终蠕变应变不得超过0.5%。测试设备需配备高精度位移传感器（分辨率 $\pm 1 \mu\text{m}$ ）和气氛控制系统。蠕变应变按公式（13）计算：

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (13)$$

式中：

- ΔL ——长度变化量，单位为毫米（mm）；
- L_0 ——原始长度，单位为毫米（mm）。

5.5.4 环境与应力加载

试样（50 mm×10 mm×3 mm）置于GB/T 2423.3-2016规定的恒定湿热环境（85℃±2℃/85%RH±5% RH）中，通过四点弯曲装置（外跨距 $S_0=30\text{ mm}$ ，内跨距 $S_i=10\text{ mm}$ ）施加持续静态应力。载荷 P 按公式（14）计算：

$$P = \frac{4\sigma WT^2}{3(S_0 - S_i)} \dots\dots\dots (1)$$

- 式中：
- P ——需施加的载荷，单位为牛顿（N）；
 - σ ——材料极限弯曲强度，单位为帕斯卡（Pa）；
 - W ——试样宽度，单位为毫米（mm）；
 - T ——试样厚度（加载方向尺寸），单位为毫米（mm）；
 - S_0 ——外跨距（下支撑点间距），单位为毫米（mm）；
 - S_i ——内跨距（上支撑点间距），单位为毫米（mm）。

6 试验设备

6.1 力学性能测试设备

力学性能测试设备应符合表1的要求。

表 1 力学性能测试设备

设备名称	技术参数要求
万能材料试验机	该设备量程不小于100 kN，加载速率范围0.001 mm/min~500 mm/min且精度达到±1%，配备高温测试夹具最高可支持1200℃（空气环境）或800℃（惰性气体环境）的测试条件，内置高精度引伸计（±0.5%测量变形量），应符合GB/T 16825.1-2022对陶瓷材料力学性能测试的全部要求。设备配置全自动载荷控制系统，能实现恒应力、恒应变等多种加载模式。
高频疲劳试验机	设备工作频率在1 Hz~20 Hz范围内可调，最大载荷达50 kN，配备800℃高温环境箱，控温精度为±3℃。采用液压伺服系统，确保正弦波的波形失真度不大于3%，符合GB/T 3075-2021等对陶瓷材料高温疲劳性能的测试要求。
维氏硬度计	采用1 N~300 N可调载荷，配备40倍物镜（数值孔径NA不小于0.65）和图像分析系统，压痕对角线测量精度±0.5 μm，应符合GB/T 4340.1-2024的要求。
激光热导仪	测试范围覆盖0.1 mm²/s~1000 mm²/s的热扩散系数，温度范围-120℃~2000℃，采用Nd:YAG激光器（脉冲能量稳定性±1%），应符合GB/T 22588-2008的要求。

6.2 电气性能测试设备

电气性能测试设备应符合表2的要求。

表 2 电气性能测试设备

设备名称	技术参数要求
矢量网络分析仪	频率范围10 MHz~43.5 GHz，动态范围不小于110 dB，配备专用高温测试夹具（工作温度至800℃），电压驻波比SWR不大于1.2，应符合GB/T 35678-2017及GB/T 14733.10-2024中对电磁波测试设备的相关要求。
介电谐振腔测试系统	支持1 GHz、10 GHz、18 GHz、40 GHz等多个特征频点测试，Q值测量精度±5%，温度控制范围25℃~800℃（精度±1℃），应符合GB/T 12636-1990的要求。系统采用自动调谐技术，可快速匹配不同介电常数的试样。
高温介电测试箱	温度范围为室温至1000℃，配置空气/氮气双气氛控制系统（氧含量不大于10 ppm），射频馈入损耗不大于0.5 dB，应符合GB/T 5594.4-2015及GB/T 1409-2006的要求。箱体采用多层隔热设计，确保高温测试时的温度均匀性控制在±3℃以内。

6.3 环境试验设备

环境试验设备应符合表3的要求。

表 3 环境试验设备

设备名称	技术参数要求
盐雾试验箱	温度控制精度 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ ，盐雾沉降量 $1.0\text{ mL}/(\text{h}\cdot 80\text{ cm}^2)\sim 2.0\text{ mL}/(\text{h}\cdot 80\text{ cm}^2)$ ，pH值自动调节范围 $6.5\sim 7.2$ ，应符合GB/T 10125-2021的要求。箱体采用PVC或玻璃钢，配备压缩空气净化系统和自动补水装置，可连续稳定运行1000小时以上。
太阳辐射试验箱	光谱范围覆盖 $290\text{ nm}\sim 3000\text{ nm}$ ，辐照度在 340 nm 处控制为 $0.55\text{ W}/\text{m}^2\pm 0.2\text{ W}/\text{m}^2$ ，黑板温度控制在 $60^{\circ}\text{C}\pm 3^{\circ}\text{C}$ ，应符合GB/T 16422.2-2022的要求。

7 存储与运输要求

7.1 存储条件

材料应储存在温度 $10^{\circ}\text{C}\sim 30^{\circ}\text{C}$ 、相对湿度不大于60%RH的洁净环境中，避免阳光直射。氧化物陶瓷基材料可存放于普通仓库，非氧化物陶瓷基材料应在氮气保护柜（氧含量不大于100ppm）或真空包装中储存。堆叠高度不高于1m或按部件承重极限计算，层间需用软质隔垫分隔。存储区应远离酸、碱等腐蚀性物质，距热源不高于2m。包装材料应采用防静电铝箔袋（表面电阻 $10^4\Omega\sim 10^6\Omega$ ），内附干燥剂（水分含量不高于0.5g/L包装容积）。

7.2 运输规范

运输过程中应采用防震包装箱，内部使用聚氨酯泡沫或气柱袋固定，缓冲材料厚度不小于50mm。运输温度范围 $-20^{\circ}\text{C}\sim 60^{\circ}\text{C}$ ，非氧化物材料在大于 40°C 环境下运输时需配备温控装置（氮气纯度不低于99.999%，氧含量不高于10ppm）。单件包装毛重不高于25kg，外箱醒目处标注“易碎品”、“防潮”、“向上”标识。陆运振动量级控制在 0.5 g 以内（频率 $5\text{ Hz}\sim 200\text{ Hz}$ ），空运应符合IATA Packing Instruction 902规定。到货后应在24小时内开箱检查，记录温湿度数据及包装完整性。

8 质量控制与检测

8.1 原材料检测

陶瓷粉体纯度不小于99.9%（ICP-MS检测），粒径分布D50为 $0.5\mu\text{m}\sim 2\mu\text{m}$ （激光粒度仪测试）。纤维增强体含水率不高于0.1%（ 105°C 烘干法）。单丝拉伸强度按GB/T 31290-2022进行测试，单丝拉伸强度不小于2000MPa。每批次原材料需留样至少100g，保存期限不低于产品保质期的1.5倍。关键原料（如SiC粉体）需进行放射性检测（ γ 射线剂量率不大于 $0.3\mu\text{Sv/h}$ ）。

8.2 生产过程控制

每炉次需随炉放置3个过程监测试样，用于密度（阿基米德法）、孔隙率[气体吸附法（BET）或X射线断层扫描]和显微结构（SEM）检测。在线监测系统需记录温度-压力-时间全曲线，数据保存双备份（云端+物理介质），定期校验。

8.3 成品检验

每批次随机抽取5%的样品进行全项性能测试；不合格品需追溯至生产环节，纠正措施验证报告，分析原因并整改。

8.4 质量文档管理

建立全生命周期质量档案，包括：原材料检验报告、工艺参数记录、成品检测原始数据和不合格品处理记录。所有文档电子化存储，采用区块链技术防篡改，保存期限不小于产品服役周期+5年。（自产品交付之日起计）。

参 考 文 献

- [1] GJB 2038A-2011 雷达吸波材料反射率测试方法
 - [2] IEC 60068-2-5:2018 Environmental testing - Part 2-5: Tests - Test Sa: Simulated solar radiation at ground level and guidance for solar radiation testing and weathering
-