

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

纤维增强透波复合材料性能要求及测试方法

Performance requirements and test methods of fiber-reinforced wave-transmitting 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 实验设备 6

7 存储与运输要求 7

8 质量控制与检测 7

参考文献 9

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：××××、××××、××××。

纤维增强透波复合材料性能要求及测试方法

1 范围

本文件规定了纤维增强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。

本文件适用于以热固性树脂（如环氧树脂、氰酸酯、聚酰亚胺等）为基体，石英纤维、芳纶纤维、玻璃纤维为增强相的透波复合材料。材料制备工艺包括热压罐成型、模压成型、RTM（树脂传递模塑）成型等，主要应用于高频通信设备（8 GHz~40 GHz）、雷达罩、卫星天线罩等领域。

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 191-2008 包装储运图示标志
- GB/T 228.2-2015 金属材料 拉伸试验 第2部分：高温试验方法
- GB/T 1447-2005 纤维增强塑料拉伸性能试验方法
- GB/T 1449-2005 纤维增强塑料弯曲性能试验方法
- 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 3365-2008 碳纤维增强塑料孔隙含量和纤维体积含量试验方法
- GB/T 4339-2008 金属材料热膨胀特征参数的测定
- GB/T 5210-2006 色漆和清漆拉开法附着力试验
- GB/T 7141-2008 塑料热老化试验方法
- GB/T 8237-2005 纤维增强塑料用液体不饱和聚酯树脂
- GB/T 10125-2021 人造气氛腐蚀试验 盐雾试验
- GB/T 12190-2021 电磁屏蔽室屏蔽效能的测量方法
- GB/T 12636-1990 微波介质基片复介电常数带状线 测试方法
- GB/T 16545-2015 金属和合金的腐蚀 腐蚀试样上腐蚀产物的清除
- 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 17626.3-2023 电磁兼容 试验和测量技术 第3部分：射频电磁场辐射抗扰度试验
- GB/T 22588-2008 闪光法测量热扩散系数或导热系数
- GB/T 25995-2010 精细陶瓷密度和显气孔率试验方法
- GB/T 30969-2014 聚合物基复合材料短梁剪切强度试验方法
- GB/T 31290-2022 碳纤维 单丝拉伸性能的测定
- GB/T 32368-2015 胶粘带耐高温高湿老化的试验方法

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

纤维增强透波复合材料 fiber-reinforced wave-transmitting composites

以热固性聚合物为基体，纤维为增强相，通过层压、模压、热压罐成型、RTM等工艺制备的透波材料。

3.2

电磁波传输性能 electromagnetic wave transmission performance

材料在特定频段内(如8GHz~40GHz)传输电磁波能量的效率,该性能主要由材料的介电常数(ε')和损耗角正切($\tan\delta$)决定,通常表征为功率传输系数($|S_{21}|^2$)。

3.3

反射损耗 reflection loss

指材料吸收电磁波能量并将其耗散,从而减少电磁波反射的能力,常用分贝(dB)表示,其值越小(负的绝对值越大)表示吸波性能越好。测试频率范围为8GHz~40GHz。

4 材料性能要求

4.1 机械性能

4.1.1 拉伸强度

材料在室温(23 ± 2)℃下的拉伸强度要求单向复合材料不小于800MPa,织物增强复合材料不小于500MPa。经湿热试验后,材料的拉伸强度保持率应达到90%以上,拉伸模量保持率不低于85%。

4.1.2 弯曲强度

在室温(23 ± 2)℃下,单向复合材料的弯曲强度应不小于600MPa、弯曲模量不小于25GPa;织物增强复合材料的弯曲强度应不小于400MPa,弯曲模量不小于18GPa(具体数值需根据纤维类型和铺层设计确定)。

4.1.3 层间剪切强度

热压罐成型材料不小于70MPa,模压成型材料不小于50MPa,手糊工艺材料不小于40MPa。

4.2 电磁性能

4.2.1 功率传输系数

材料在8GHz~40GHz频段应满足严格的功率传输系数要求:8GHz~18GHz频段不低于92%(允差 $\pm 2\%$),18GHz~40GHz频段不低于88%(允差 $\pm 3\%$)。

4.2.2 介电常数

在8GHz~40GHz全频段范围内,材料的介电常数实部(ε')要求不大于4.0,虚部(ε'')不大于0.005。

4.2.3 损耗因子

材料在8GHz~40GHz频段的 $\tan\delta$ 应控制在不大于0.001的水平。

4.3 热性能

4.3.1 热膨胀系数

材料在8GHz~40GHz工作频段内,轴向热膨胀系数要求不大于 $3.0\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ($-60^{\circ}\text{C}\sim 120^{\circ}\text{C}$),径向不大于 $5.0\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 。

4.3.2 热导率

室温下材料热导率不小于 $15\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 120°C 时不小于 $12\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

4.4 环境适应性

4.4.1 湿热稳定性

材料在 $85^{\circ}\text{C}/85\%\text{RH}$ 环境下暴露240小时后,8GHz~40GHz频段功率传输系数衰减不大于3%,介电常数变化率不大于5%。

4.4.2 盐雾腐蚀

经5wt.%NaCl盐雾试验48小时后，材料表面腐蚀面积不大于0.1%，8GHz~40GHz频段功率传输系数变化不大于2%。

4.5 长期稳定性

4.5.1 疲劳性能

在60%极限强度载荷下，经 10^6 次循环后，材料在8GHz~40GHz频段的功率传输系数变化不大于2%，介电常数变化不大于3%。

4.5.2 高温氧化

材料经高温空气暴露试验后需满足：在300℃环境持续100小时（陶瓷基材料可采用1200℃）作用下，40GHz频段功率传输系数保持率不小于90%，且质量损失率不超过0.2%。

5 测试方法

5.1 机械性能测试

5.1.1 拉伸强度测试

按GB/T 1447-2005的规定，采用电子万能试验机进行测试。室温测试时，试样尺寸为250mm×25mm×2mm（单向）或200mm×25mm×3mm（织物增强），加载速率2mm/min，环境温度23℃±2℃。高温测试按GB/T 228.2-2015执行，升温速率不高于30 K/min，120℃保温不低于20 min，加载速率2mm/min。数据处理时，应力-应变曲线应扣除系统柔度，取5个有效试样平均值，剔除偏离均值±15%的异常值。试样两端按GB/T 3354-2014用玻璃纤维/环氧树脂增强环氧树脂补强片加固，防止夹持部位破坏。试样强度按公式(1)计算：

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

式中：

- σ ——拉伸强度，单位为兆帕（MPa）；
- P ——试样断裂时的最大载荷，单位为牛（N）；
- A ——试样截面积，单位为平方毫米（mm²）。

5.1.2 弯曲强度测试

按GB/T 1449-2005的规定，采用三点弯曲夹具（跨距30mm）。试样尺寸40mm×5mm×3mm，加载速率0.5mm/min。高温测试时，采用红外加热炉维持120℃±2℃恒温环境。对于不同编织方式（平纹/斜纹/缎纹），应分别制备6个试样测试，结果取平均值±2倍标准差。

5.1.3 层间剪切强度

按GB/T 30969-2014规定的短梁剪切法执行。试样尺寸为25mm×5mm×5mm，尺寸公差控制在±0.5mm以内，跨距设置为20mm，加载速率为0.5mm/min。对于热压罐成型试样，测试前应经120℃后固化2小时；手糊工艺试样则应室温固化7天。试验过程中应密切观察破坏模式：纯剪切破坏为有效数据，拉伸/压缩破坏则视为无效。每组至少测试10个有效数据，剔除偏离均值±20%的异常值。材料的层间剪切强度(τ)按公式(2)计算：

$$\tau = \frac{3P}{4BH} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

- τ ——层间剪切强度，单位为兆帕（MPa）；
- P ——最大载荷，单位为牛（N）；
- B ——试样宽度，单位为毫米（mm）；
- H ——试样厚度，单位为毫米（mm）。

5.2 电磁性能测试

5.2.1 功率传输系数测试

参考 GJB 2038A-2011 的规定,测试系统由矢量网络分析仪(频率范围 8 GHz~40 GHz)、标准增益喇叭天线(8 GHz~12 GHz 使用 DRG-118 型,26 GHz~40 GHz 使用 DRG-340 型)和微波暗室(背景噪声 ≤ -60 dBm)组成。试样尺寸为 200 mm×200 mm×2.0 mm(公差 ± 0.1 mm),表面粗糙度 R_a 不大于 1.6 μm 。测试前采用标准衰减片校准系统插损,并通过“空气-短路”法消除设备误差。功率传输系数按公式(3)计算:

$$T = |S_{21}|^2 \times 100\% \quad (1)$$

式中:

S_{21} ——散射参数中的传输系数。

5.2.2 介电常数测试

5.2.2.1 按 GB/T 12636-1990 的规定,并参照 IEC 61189-2:2006 的规定,8 GHz~18 GHz 频段采用矩形波导法(WR-90 波导),18 GHz~40 GHz 频段采用准光学法。波导法试样尺寸为 22.86 mm×10.16 mm×(2.0 $\pm$ 0.1) mm,准光学法试样为(Φ)60 mm×(3.0 $\pm$ 0.1) mm。测试前应用等离子清洗仪处理试样表面,测试环境控制在 23 $\pm$ 1 $^{\circ}\text{C}$ 、湿度 50% $\pm$ 5%。数据处理采用 NRW 算法求解介电常数实部(ϵ')和虚部(ϵ''),并考虑波导壁损耗修正。

5.2.2.2 为确保测试数据的完整性,测试频率点至少应包含 8 GHz、12 GHz、18 GHz、26 GHz、33 GHz、40 GHz 等特征频点。测试过程中,应严格控制环境条件,温度保持在(23 $\pm$ 1) $^{\circ}\text{C}$,相对湿度(50 $\pm$ 5)%,同时试样制备应符合标准规定的尺寸公差和表面处理要求。

5.2.3 损耗因子测试

5.2.3.1 按 GB/T 12636-1990 的规定,8 GHz~18 GHz 频段采用带状线法,试样尺寸为长 100 mm $\pm$ 0.5 mm、宽 10 mm $\pm$ 0.1 mm、厚度(2.0 $\pm$ 0.05) mm,表面粗糙度 R_a 不大于 0.8 μm ,需保证试样上下表面平行度不大于 0.01 mm;18 GHz~40 GHz 频段采用微带线法,试样为(50.0 $\pm$ 0.2) mm×(50.0 $\pm$ 0.2) mm×(1.0 $\pm$ 0.02) mm 的方形片,表面需经等离子体清洗处理,去除油污及杂质。测试在符合 GB/T 17626.3-2023 要求的电磁屏蔽室内进行,背景噪声不大于 -60 dBm,环境温度控制在 23 $\pm$ 1 $^{\circ}\text{C}$,相对湿度 50% $\pm$ 5%。通过公式(4)计算损耗因子:

$$\tan \delta = \frac{\Delta f}{f_0} \quad (1)$$

式中:

$\tan \delta$ ——损耗因子;

Δf ——谐振曲线半高宽,单位为赫兹(Hz);

f_0 ——谐振中心频率,单位为赫兹(Hz)。

5.2.3.2 高频段(大于 26 GHz)测试时,要特别注意消除边缘效应的影响,试样应进行精密加工,尺寸公差控制在 ± 0.02 mm 以内,边缘应做倒角处理(R0.2 mm)。测试环境应保持稳定,避免外界电磁干扰,确保测试结果的可靠性。

5.3 热性能测试方法

5.3.1 热膨胀系数测试

按 GB/T 4339-2008 的规定,采用推杆式热膨胀仪进行测量,试样尺寸为 25 mm×5 mm×5 mm(长度方向为待测试方向),测试前应在 105 $^{\circ}\text{C}$ 下烘干 2 小时以消除湿气影响。测试过程中,升温速率控制为 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$,测试温度范围为 -60 $^{\circ}\text{C}$ ~120 $^{\circ}\text{C}$,测试环境为氮气保护(纯度 $\geq 99.99\%$)。

对于纤维增强复合材料,需分别进行轴向(平行于纤维方向)和径向(垂直于纤维方向)的热膨胀系数测试,并在测试报告中明确标注纤维方向。数据采集时,应按 GB/T 4339-2008 的要求扣除仪器本底膨胀值,每组测试至少进行 3 次平行试验,取算术平均值作为最终结果。同时,需按温度区间(如 -60 $^{\circ}\text{C}$ ~20 $^{\circ}\text{C}$ 、20 $^{\circ}\text{C}$ ~120 $^{\circ}\text{C}$)对热膨胀曲线进行分段拟合,以更精准表征不同温度区间的热膨胀特性。

5.3.2 热导率测试

按GB/T 22588-2008的规定,采用激光闪射法进行测试。试样为直径 (12.7 ± 0.1) mm、厚度 (3.0 ± 0.05) mm的圆片,两面镀金(金层厚度 $200 \text{ nm} \pm 20 \text{ nm}$),平行度不大于 0.01 mm 。测试前试样应在 105°C 烘干2h以消除湿气影响。测试过程:使用Nd:YAG激光器(波长 1064 nm ,脉冲能量 5 J ,脉宽 0.8 ms)照射试样下表面,通过红外探测器记录上表面温升曲线,热扩散系数 α 按公式(5)计算,热导率(λ)按公式(6)计算:

$$\alpha = \frac{0.1388L^2}{t_{\frac{1}{2}}} \quad (1)$$

式中:

α ——热扩散系数,单位为平方毫米每秒(mm^2/s);

L ——试样厚度,单位为毫米(mm);

$t_{\frac{1}{2}}$ ——温升达到最大值50%所需时间,单位为秒(s)。

$$\lambda = \alpha \times C_p \times \rho \quad (2)$$

式中:

λ ——热导率,单位为瓦特每米开尔文[W/(m·K)];

α ——热扩散系数,单位为平方米每秒(m^2/s);

C_p ——比热容,单位为焦耳每千克开尔文[J/(kg·K)];

ρ ——材料密度,单位千克每立方米(kg/m^3)。

5.4 环境适应性测试方法

5.4.1 湿热试验

按GB/T 32368-2015的规定,将试样置于恒温恒湿箱中,在 85°C 和85%相对湿度条件下持续暴露240小时。为确保测试准确性,试样在测试前需在标准环境条件($23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ 、50%RH $\pm 5\%$ RH)下平衡24小时。试验完成后,首先使用矢量网络分析仪进行8 GHz~40 GHz全频段传输系数扫描,相对于初始值衰减不大于3%;其次在8 GHz、16 GHz、32 GHz和40 GHz等特征频点测试介电常数,要求变化率控制在5%以内;最后对试样进行目视检查和200倍光学显微镜观察,确认无分层、起泡、变色等缺陷。

5.4.2 盐雾试验

按GB/T 10125-2021的规定,配置5wt.%浓度的NaCl溶液作为腐蚀介质,试验箱温度维持在 35°C ,试样以 45° 倾斜角放置以确保腐蚀均匀,喷雾量控制在 $(1.0 \sim 2.0) \text{ mL}/(\text{h} \cdot \text{cm}^2)$ 范围内,持续48小时。试验结束后,先用去离子水按GB/T 16545-2015进行中性清洗表面盐结晶,避免二次损伤;然后使用激光共聚焦显微镜(分辨率不大于 $1 \mu\text{m}$)定量分析腐蚀面积,要求不超过总面积的0.1%;接着复测8 GHz~40 GHz频段的功率传输系数,确保变化不超过2%;最后按GB/T 5210-2006进行附着力测试。每组试验至少包含3个平行试样以保证数据可靠性。

5.5 长期稳定性测试方法

5.5.1 疲劳性能测试

按GB/T 3075-2021的规定,设置应力比 $R=0.1$,加载频率为10 Hz,总循环次数不少于 10^6 次。在测试过程中,每完成 2×10^5 次循环即暂停试验进行三项关键检测:首先采用超声C扫描技术检查材料内部损伤情况;然后在8 GHz、16 GHz、24 GHz、32 GHz和40 GHz等特征频点测试功率传输系数,要求变化不超过2%;最后进行三点弯曲强度测试评估力学性能衰减。试样失效判定标准为功率传输系数衰减超过限值或出现可见裂纹。试验全程在恒温恒湿环境中进行,确保数据可比性。

5.5.2 高温氧化试验

树脂基材料按GB/T 7141-2008的规定,在 300°C 空气环境中持续暴露100小时(陶瓷基材料参照GB/T 25995-2010采用 1200°C),测试前试样表面经精密抛光至 R_a 不大于 $0.1 \mu\text{m}$;试验完成后于室温环境检

测质量损失率（不大于0.2%）及40 GHz功率传输系数保持率（不小于90%），其中透波性能测试需在试样冷却至23℃±2℃稳态后进行。

6 实验设备

6.1 力学性能测试设备

力学性能测试设备应符合表1。

表1 力学性能测试设备

设备名称	技术参数要求
电子万能试验机	应符合GB/T 16825.1-2022，载荷范围0.01 kN~5 kN，精度±0.5%，位移分辨率1 μm；配置高低温环境箱（-70℃~300℃，控温±2℃）。
高温拉伸试验机	应符合GB/T 228.2-2015的规定，升温速率不大于10 K/min，最高温度300℃（陶瓷材料选配1200℃），配备引伸计（精度±1 μm）
短梁剪切试验装置	应符合GB/T 30969-2014的规定，载荷量程1 kN（精度0.5%），位移分辨率0.01 mm。

6.2 电磁性能测试设备

电磁性能测试设备应符合表2的要求。

表2 电磁性能测试设备

设备名称	技术参数要求
矢量网络分析仪	频率范围100 MHz~40 GHz，动态范围不小于100 dB@40GHz，不确定度不大于2%
微波暗室	应符合GB/T 12190-2021的规定，屏蔽效能不小于80 dB@10GHz，背景噪声不低于-60 dBm
谐振腔测试系统	应符合GB/T 12636-1990和GB/T 17626.3-2023的要求，Q值范围102~104，温度控制40℃~150℃（±2℃），支持TE/TM模。

6.3 热性能测试设备

热性能测试设备应符合表3的要求。

表3 热性能测试设备

设备名称	技术参数要求
激光导热仪	应符合GB/T 22588-2008的规定，热扩散系数0.1 mm²/s~100 mm²/s，温度范围-50℃~300℃（陶瓷材料可扩展至2000℃）；激光波长1064 nm，数据采集速率不小于100 kHz
热膨胀仪	符合GB/T 4339-2008的规定，示值误差±0.1 μm，真空度不大于10⁻³ Pa，控温精度±0.5℃

6.4 环境适应性测试设备

环境适应性测试设备应符合表4的要求。

表4 环境适应性测试设备

设备名称	技术参数要求
------	--------

设备名称	技术参数要求
恒温恒湿箱	应符合GB/T 2423.3-2016的规定，温度变化速率不大于1℃/min，容积不小于100L（有效利用率不小于60%），配备冷凝水自动排放系统
盐雾试验箱	应符合GB/T 10125-2021的规定，喷雾量1.0mL/(h·cm²)~2.0mL/(h·cm²)，pH值6.5~7.0（自动监控），箱体材质聚丙烯+玻璃纤维增强塑料（GB/T 8237-2005）

7 存储与运输要求

7.1 存储条件

7.1.1 材料应储存在温度20℃~30℃、相对湿度不超过60%的清洁干燥环境中，符合GB/T 191-2008的要求，层压材料叠放高度不超过1m；异形构件应使用专用支架垂直固定，避免层间剪切或弯曲应力造成损伤。

7.1.2 所有材料应保留原厂包装，包装内放置干燥剂并定期更换。

7.1.3 存储环境应定期巡检，记录温湿度变化。

7.2 运输要求

运输过程中应采用防潮、防震、抗压的密闭包装，内衬5cm以上厚度的缓冲材料（如PE泡沫）。包装箱应符合GB/T 4857-2008的跌落试验要求，承受1.2m高度自由跌落无破损。运输环境温度应控制在-20℃~50℃范围内，避免极端温度导致材料热膨胀系数变化或脆化。长途运输应使用温湿度记录仪全程监控，数据保存不少于3年。海运时应包装盐雾渗透率不大于5mg/m²·d（按GB/T 10125-2021进行验证），空运应符合IATA《危险品规则》的特殊包装要求。运输车辆应配备防震装置，振动量级不超过0.5g（频率范围5Hz~200Hz）。

8 质量控制与检测

8.1 原材料检测

所有进场原材料应进行批次检验，石英纤维单丝拉伸强度不小于1800MPa，应符合GB/T 31290-2022中对石英纤维单丝拉伸强度的要求，直径偏差不大于±1%。树脂基体检测包括：300mPa·s±50mPa·s（23℃）、环氧值（0.45eq/100g~0.55eq/100g）和挥发分（不大于1.5%）。增强纤维应通过SEM检查表面处理质量，界面剪切强度不小于40MPa，参照ASTM D2344/D2344M-22中对界面剪切强度的要求。每批原材料应保留5%的备样，保存期不少于产品保质期的1.5倍。

8.2 过程控制

生产过程实施首件检验、巡检和末件检验制度。采用在线监测系统实时记录工艺参数：热压罐成型温度偏差不大于±2℃，压力控制精度±0.05MPa。每生产班次进行3次纤维体积含量测试（阿基米德法），允许波动范围±2%。界面性能通过单纤维顶出试验监控，参照EN 6033中对界面剪切强度的要求，要求界面剪切强度不小于40MPa。开孔隙率检测按GB/T 3365-2008的要求采用氦气比重法，控制指标不大于1%。所有过程数据纳入MES系统，可追溯期不少于10年。

8.3 成品检验

成品检验应严格执行全尺寸检测（三坐标测量仪，公差±0.5mm）、超声C扫描（分辨率0.5mm，分层缺陷不多于0.1%试样面积）及8GHz~40GHz全频段功率传输系数测试，参照GJB 5023.1A-2012的要求进行8GHz~40GHz全频段功率传输系数测试，同时按GB/T 22588-2008采用激光闪射法测定热导率。所有检测数据录入MES系统，保存期限不少于产品寿命周期的2倍，不合格品应进行原因分析，确保质量闭环控制。

参 考 文 献

- [1] GJB 5023.1A-2012 材料和涂层反射率和发射率测试方法 第1部分：反射率
 - [2] GJB 2038A-2011 雷达罩用透波复合材料性能测试方法
 - [3] ASTM D2344/D2344M-22 Standard Test Method for Short-Beam Strength of Polymer Matrix Composite Materials and Their Laminates
 - [4] EN 6033 Aerospace series - Carbon fibre reinforced plastics - Test method - Determination of interlaminar fracture toughness energy - Mode I - GIC
 - [5] IEC 61189-2:2006 Test methods for electrical materials, interconnection structures and assemblies-Part 2: Test methods for materials for interconnection structures
 - [4] IATA 危险品规则
-