

T/CWDPA

团 体 标 准

T/CWDPA XXXX—2026

航空航天用气凝胶隔热材料性能测试规范

Performance testing specification for aerogel thermal insulation materials for
aerospace applications

(征求意见稿)

XXXX-xx-xx 发布

XXXX-xx-xx 实施

中国西部开发促进会 发布

目 次

- 前 言 III
- 1 范围 1
- 2 规范性引用文件 1
- 3 术语和定义 1
- 4 缩略语 1
- 5 测试要求 1
 - 5.1 试样制备 2
 - 5.2 测试环境 2
 - 5.3 仪器要求 2
- 6 测试项目 3
 - 6.1 物理性能测试 3
 - 6.2 热学性能测试 3
 - 6.3 力学性能测试 4
 - 6.4 环境耐受性能测试 4
 - 6.5 微观结构表征 4
- 7 数据处理与判定规则 4
 - 7.1 数据处理 4
 - 7.2 判定规则 4
- 8 测试报告内容要求 4

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。

本文件由中国西部开发促进会提出。

本文件由中国西部开发促进会归口。

本文件起草单位：。

本文件主要起草人：。

航空航天用气凝胶隔热材料性能测试规范

1 范围

本文件规定了航空航天用气凝胶隔热材料的缩略语、测试要求、测试项目、测试方法、数据处理与判定规则、测试报告。

本文件适用于航空航天用气凝胶隔热材料。

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 5480 矿物棉及其制品试验方法

GB 8624 建筑材料及制品燃烧性能分级

GB/T 10294—2008 绝热材料稳态热阻及有关特性的测定 防护热板法

GB/T 10295—2008 绝热材料稳态热阻及有关特性的测定 热流计法

GB/T 10299—2011 绝热材料憎水性试验方法

GB/T 19587 气体吸附BET法测定固态物质比表面积

GB/T 21650.1 压汞法和气体吸附法测定固体材料孔径分布和孔隙度 第1部分：压汞法

GB/T 34336—2017 纳米孔气凝胶复合绝热制品

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

气凝胶 aerogel

通过溶胶凝胶法，用一定的干燥方式使气体取代凝胶中的液相而形成的一种纳米级多孔固态材料。

[来源：GB/T 34336—2017，3.1]

3.2

气凝胶隔热材料 aerogel thermal insulation material

以纳米孔气凝胶（如二氧化硅、碳等）为基体，通过纤维增强或复合工艺制成的具有极低导热系数的轻质隔热材料。

4 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

BET：比表面吸附法（Brunauer-Emmett-Teller）

SEM：扫描电子显微镜（Scanning Electron Microscope）

TGA：热重分析（Thermogravimetric Analysis）

5 测试要求

5.1 试样制备

5.1.1 抽样

试样应从同一批次、同一规格的成品中随机抽样，抽样比例为每批次抽取不少于5件成品，从每件成品上截取试样，各测试项目平行试样数量不少于3个，满足所有测试项目需求。

5.1.2 尺寸要求

试样应按具体测试方法要求切割，尺寸公差正 ± 0.5 mm，具体尺寸如下：

- a) 导热系数测试：
 - 1) 防护热板法：300mm \times 300mm \times （5~20）mm；
 - 2) 热流计法：200mm \times 200mm \times （5~20）mm。
- b) 力学性能测试：
 - 1) 压缩：100mm \times 100mm \times （10~20）mm；
 - 2) 拉伸：150mm \times 50mm \times （5~10）mm。
- c) 热稳定性测试：50mm \times 50mm \times （5~10）mm；
- d) 孔隙率/比表面积测试：10mm \times 10mm \times 5mm（粉末/块状）；
- e) 憎水性/吸湿性测试：100mm \times 100mm \times （5~20）mm。

5.1.3 外观要求

试样表面应平整、无裂纹、无分层、无杂质，边缘切割整齐；纤维增强型试样应避免纤维外露或脱落。

5.1.4 预处理

5.1.5 常规试样：试样应在 $105\pm 5^\circ\text{C}$ 烘箱中干燥2 h，随后在干燥器中冷却至室温后立即进行测试；

5.1.6 特殊试样：碳气凝胶等易氧化、潮解型试样，干燥后在惰性气体保护下冷却至室温，全程在密闭环境中转移和测试。

5.1.7 切割要求

应采用专用金刚石切割刀进行试样切割，纤维增强型试样切割后需对边缘进行轻微打磨，打磨精度 ≤ 0.1 mm，避免纤维脱落。

5.2 测试环境

5.2.1 常规测试应符合以下要求：

- a) 温度： $23\pm 2^\circ\text{C}$ ；
- b) 相对湿度 $50\pm 5\%$ ；
- c) 无强磁场、无振动、无气流干扰。

5.2.2 极端环境测试应符合以下要求：

- a) 高温测试：最高温度 $\geq 1200^\circ\text{C}$ ，控温精度 $\pm 5^\circ\text{C}$ ；
- b) 低温测试：最低温度 $\leq -196^\circ\text{C}$ ，控温精度 $\pm 2^\circ\text{C}$ ；
- c) 真空测试：真空度 $\leq 1\times 10^{-3}\text{Pa}$ ，漏率 $\leq 1\times 10^{-5}\text{Pa}\cdot\text{L}/\text{s}$ ；
- d) 辐照测试：电子辐照剂量 $\geq 1\times 10^6\text{Gy}$ ， γ 辐照剂量 $\geq 1\times 10^7\text{Gy}$ ，辐照过程中环境温度 $23\pm 5^\circ\text{C}$ ，辐照后在常规测试环境放置24h再进行性能测试。

5.3 仪器要求

5.3.1 通用要求

所有测试仪器应经计量校准合格，校准周期不超过12个月，测试前需对仪器进行预热和调试，确保仪器处于正常工作状态。

5.3.2 专用仪器要求

- 5.3.2.1 导热系数测试仪：防护热板仪精度±2%、热流计仪精度±3%，应满足 GB/T 10294、GB/T 10295 要求。
- 5.3.2.2 力学试验机：万能材料试验机，量程 0kN~100kN，精度±0.5%，应满足 GB/T 5486、ASTM D695 要求。
- 5.3.2.3 热重分析仪（TGA）：温度范围室温~1200℃，升温速率 1℃/min~20℃/min，精度±1℃。
- 5.3.2.4 比表面积分析仪：应按 GB/T 19587 要求，BET 法测试精度±2%。
- 5.3.2.5 孔隙率测试仪：应按 GB/T 21650.1 要求，压汞法气体吸附法可选。
- 5.3.2.6 真空系统：分子泵+机械泵组合，真空度≤1×10⁻⁴Pa。
- 5.3.2.7 其他仪器：电子天平（精度 0.1mg）、游标卡尺（精度 0.02mm）、比表面积分析仪（BET 法）、扫描电子显微镜（SEM）等。

6 测试项目

6.1 物理性能测试

6.1.1 密度

应按照 GB/T 34336—2017 中 6.4 的规定进行试验，分别测试表观密度和骨架密度，测试结果保留 3 位有效数字，单位为 kg/m³。

6.1.2 厚度与尺寸偏差

应按照 GB/T 34336—2017 中 6.3 的规定进行试验，在试样不同位置选取不少于 5 个测试点，计算平均值，尺寸偏差以百分比表示。

6.1.3 孔隙率与比表面积

6.1.3.1 采用压汞法或气体吸附法测试，通过材料表观密度与骨架密度按照公式（1）计算孔隙率：

$$\text{孔隙率} = \frac{(1 - \text{表观密度})}{\text{骨架密度}} \times 100\% \dots\dots\dots (1)$$

6.1.3.2 采用 BET 法（低温氮吸附法）测试，通过氮气吸附-脱附等温线计算材料比表面积，其中 SiO₂ 气凝胶要求 ≥400m²/g，碳气凝胶要求 ≥600m²/g。

6.2 热学性能测试

6.2.1 常温/高温热导率

6.2.1.1 应按照 GB/T 10294、GB/T 10295 中的规定进行测试。

6.2.1.2 测试温度点：25℃、100℃、300℃、500℃、800℃、1000℃、1200℃（按需）。

6.2.1.3 测试流程：试样置于热板与冷板之间，设定温差，待热平衡后记录热流与温度，按傅里叶定律计算热导率 λ。

6.2.1.4 测试指标应符合以下要求：

- a) 25℃：≤0.020W/(m·K)（纤维增强）；≤0.018W/(m·K)（块状）；
- b) 500℃：≤0.070W/(m·K)；
- c) 1000℃：≤0.120W/(m·K)（陶瓷纤维增强）；
- d) 1200℃：陶瓷纤维增强 SiO₂气凝胶 ≤0.15。

6.2.2 真空热导率

应按照 GB/T 10294 中的规定，在真空度 1×10⁻³Pa 下进行测试。

6.2.3 热稳定性

应按照 GB/T 10299 的规定进行试验。

6.2.4 冷热循环稳定性

将试样依次在-20℃±2℃环境下放置2h，80℃±2℃环境下放置2h，为1次循环，共进行30次循环。试验后在标准环境下放置24h，观察涂层外观，测试导热系数，按公式（2）计算导热系数变化率：

$$\text{导热系数变化率} = \frac{\text{试验后导热系数} - \text{实验前导热系数}}{\text{实验前导热系数}} \times 100\% \dots\dots\dots (2)$$

6.3 力学性能测试

6.3.1 抗压强度

应在加载速率0.5mm/min下，压缩至10%形变时的应力为抗压强度。

6.3.2 抗拉强度

应按照GB/T 34336—2017中6.10的规定进行试验，加载速率2mm/min，记录试样断裂时的最大拉应力，即为抗拉强度。

6.4 环境耐受性能测试

6.4.1.1 憎水性与吸湿性：应按照 GB/T 10299、GB/T 5480 的规定进行测试

6.4.1.2 耐真空稳定性：在 1×10^{-3} Pa、100℃条件下保持 72h，试样无粉化、无收缩，热导率变化率 ≤ 3%。

6.4.1.3 耐辐照性能：电子辐照（ 1×10^6 Gy）或 γ 辐照（ 1×10^7 Gy）后，热导率变化率 ≤ 5%，力学强度保留率 ≥ 90%

6.4.1.4 燃烧性能：应按照 GB 8624 的规定进行试验。

6.5 微观结构表征

应采用SEM观察气凝胶纳米网络结构、纤维分散状态、界面结合情况，要求孔径均匀、无明显团聚、纤维与基体结合紧密。

7 数据处理与判定规则

7.1 数据处理

7.1.1 每个测试项目取 ≥ 3 个平行试样的算术平均值，保留 2 位有效数字；异常值（偏差 > 10%）按格拉布斯准则剔除后重新计算。

7.1.2 热导率、力学强度等核心指标需标注测试条件（温度、真空度、加载速率）。

7.2 判定规则

7.2.1 所有测试项目均符合本规范要求时，判定为合格。

7.2.2 若有 1 项核心指标（热导率、热稳定性、抗压强度、燃烧性能）不合格，判定为不合格；非核心指标不合格，允许加倍抽样复检，复检合格则判定为合格，仍不合格则判定为不合格。

7.2.3 测试报告应包含试样信息、测试条件、原始数据、计算结果、判定结论及测试人员、日期、盖章。

8 测试报告内容要求

测试报告应至少包含以下信息：

- a) 报告编号、委托单位、测试单位；
- b) 试样名称、规格、批次、制备信息；
- c) 测试项目、依据标准、测试环境/条件；
- d) 原始数据、计算结果、平均值与偏差；
- e) 判定结论；
- f) 测试人员、审核人员、批准人员签字及日期；
- g) 测试单位盖章。

