



# 团 体 标 准

T/CEATEC XXX—XXXX

---

## 可回收火箭用陶瓷基复合材料

Recyclable rocket ceramic matrix composites

(征求意见稿)

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

---

中国欧洲经济技术合作协会 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 分类 ..... 2

5 技术要求 ..... 2

    5.1 原材料要求 ..... 2

    5.2 外观与尺寸 ..... 2

    5.3 物理性能 ..... 2

    5.4 力学性能 ..... 3

    5.5 热性能 ..... 3

    5.6 环境性能 ..... 3

    5.7 无损检测 ..... 3

    5.8 可重复使用性能 ..... 3

6 试验方法 ..... 3

    6.1 原材料检验 ..... 3

    6.2 外观与尺寸检验 ..... 4

    6.3 物理性能试验 ..... 4

    6.4 力学性能试验 ..... 4

    6.5 热性能试验 ..... 4

    6.6 环境性能试验 ..... 4

    6.7 无损检测 ..... 4

    6.8 可重复使用性能试验 ..... 4

7 检验规则 ..... 5

    7.1 检验分类 ..... 5

    7.2 出厂检验 ..... 5

    7.3 型式检验 ..... 5

8 标志、包装、运输和贮存 ..... 5

    8.1 标志 ..... 5

    8.2 包装 ..... 5

    8.3 运输 ..... 5

    8.4 贮存 ..... 5



## 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。

本文件由中国欧洲经济技术合作协会归口。

本文件起草单位：。

本文件主要起草人：。



# 可回收火箭用陶瓷基复合材料

## 1 范围

本文件规定了可回收火箭用陶瓷基复合材料的分类与标记、技术要求、试验方法、检验规则、标志、包装、运输和贮存以及质量证明文件。

本文件适用于可回收火箭发动机燃烧室、喷管、热防护系统等热端部件用2D/3D编织结构连续纤维增强陶瓷基复合材料的生产、检验和验收。其他航天飞行器可重复使用热结构部件用陶瓷基复合材料可参照执行。

## 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 包装储运图示标志
- GB/T 1450.1 纤维增强塑料层间剪切强度试验方法
- GB/T 1800.2 产品几何技术规范（GPS） 线性尺寸公差ISO代号体系 第2部分：标准公差带代号和孔、轴的极限偏差表
- GB/T 3003 耐火纤维及制品
- GB/T 6569 精细陶瓷弯曲强度试验方法
- GB/T 8489 精细陶瓷压缩强度试验方法
- GB/T 10125 人造气氛腐蚀试验 盐雾试验
- GB/T 14390 精细陶瓷高温弯曲强度试验方法
- GB/T 16535 精细陶瓷线热膨胀系数试验方法 顶杆法
- GB/T 18851.1 无损检测 渗透检测 第1部分：总则
- GB/T 22588 闪光法测量热扩散系数或导热系数
- GB/T 23805 精细陶瓷室温拉伸强度试验方法
- GB/T 25995 精细陶瓷密度和显气孔率试验方法
- GB/T 30707 精细陶瓷涂层结合力试验方法 划痕法
- GB/T 34559 碳/碳复合材料压缩性能试验方法
- GB/T 36264 超高温氧化环境下纤维复合材料拉伸强度试验方法
- GB/T 37246 精细陶瓷抗热震性能试验方法

## 3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1

**可回收火箭** reusable rocket

能够完成预定发射任务后，全部或部分箭体通过可控方式返回地面，经检修和维护后可再次执行发射任务的火箭。

### 3.2

**陶瓷基复合材料** ceramic matrix composites; CMC

以陶瓷为基体，连续纤维为增强体，通过界面相调控制备的复合材料，本文件特指 2D/3D 编织结构连续纤维增强陶瓷基复合材料。

3.3

热循环寿命 thermal cycle life

材料在规定的温度变化范围、升降温速率和保温时间条件下，经历从低温到高温再到低温的完整循环过程，直至出现规定失效形式时所能承受的最大循环次数。

3.4

致命缺陷 critical defect

可造成产品结构完整性破坏、核心功能失效，对飞行安全与重复使用可靠性构成严重危害的缺陷。

4 分类

4.1 按基体类型及适用温度分为三类：

- a) A类：SiC/SiC 复合材料，用于 1200℃~1600℃核心热端部件（燃烧室、喷管喉部）；
- b) B类：莫来石基复合材料，用于 1000℃~1400℃部件（喷管扩张段、热防护系统）；
- c) C类：氮化硅基复合材料，用于 800℃~1200℃高强度耐磨部件（涡轮泵、阀门）。

4.2 按建议表面状态代号改为：裸材代号 N (Naked/Bare)，涂层材代号 E (EBC-coated)，避免与基体类型代号冲突。

5 技术要求

5.1 原材料要求

5.1.1 增强体

SiC纤维采用符合GB/T 34559的III型及以上产品，抗拉强度 $\geq 2.5\text{GPa}$ ，弹性模量 $\geq 200\text{GPa}$ ，直径 $10\mu\text{m}\sim 15\mu\text{m}$ 。氧化铝纤维抗拉强度 $\geq 1.5\text{GPa}$ ，弹性模量 $\geq 150\text{GPa}$ ，直径 $10\mu\text{m}\sim 20\mu\text{m}$ 。

5.1.2 基体

基体纯度 $\geq 99.0\%$ ，粒度符合制备工艺要求。SiC基体密度 $\geq 2.5\text{g/cm}^3$ ；莫来石基体化学成分符合GB/T 3003规定；氮化硅基体密度 $\geq 3.2\text{g/cm}^3$ 。

5.1.3 界面相

采用热解碳、氮化硼或其复合涂层，厚度控制在 $0.1\mu\text{m}\sim 1\mu\text{m}$ ，具备有效载荷传递与纤维拔出增韧功能。

5.1.4 抗氧化涂层

采用硅化物基或稀土硅酸盐基涂层，厚度 $50\mu\text{m}\sim 200\mu\text{m}$ ，与基体结合强度 $\geq 20\text{MPa}$ ，1500℃空气环境中氧化100h无剥落、开裂现象。

5.2 外观与尺寸

制品表面应平整，无目视可见的裂纹、分层、气泡、夹杂等缺陷。表面粗糙度 $R_a\leq 6.3\mu\text{m}$ ，有特殊要求的表面符合设计图纸规定。未注尺寸公差按GB/T 1800.2的IT12级执行，形位公差 $\leq 0.3\text{mm/m}$ 。

5.3 物理性能

表 1 物理性能

| 项目                      | 试验条件     | A类（SiC/SiC）              | B类（莫来石基）                 | C类（氮化硅基）                 |
|-------------------------|----------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 密度/（g/cm <sup>3</sup> ） | 室温       | $\geq 2.5$               | 2.2~2.5                  | 2.7~3.0                  |
| 显气孔率/%                  | 室温       | $\leq 12\%$              | $\leq 15\%$              | $\leq 10\%$              |
| 热导率/（W/m·K）             | 室温       | $\geq 15$                | $\geq 8$                 | $\geq 20$                |
| 热导率/（W/m·K）             | 1200℃空气  | $\geq 10$                | —                        | —                        |
| 平均热膨胀系数/℃               | 室温~1200℃ | $\leq 5.0\times 10^{-6}$ | $\leq 5.5\times 10^{-6}$ | $\leq 3.5\times 10^{-6}$ |

5.4 力学性能

表 2 力学性能

| 项目         | 试验条件    | A类（SiC/SiC） | B类（莫来石基） | C类（氮化硅基） |
|------------|---------|-------------|----------|----------|
| 拉伸强度/MPa   | 室温      | ≥240        | ≥150     | ≥300     |
| 拉伸强度/MPa   | 1200℃空气 | ≥200        | ≥100     | ≥250     |
| 弯曲强度/MPa   | 室温      | ≥350        | ≥200     | ≥400     |
| 弯曲强度/MPa   | 1200℃空气 | ≥280        | —        | —        |
| 压缩强度/MPa   | 室温      | ≥300        | ≥180     | ≥450     |
| 层间剪切强度/MPa | 室温      | ≥25         | ≥15      | ≥30      |

5.5 热性能

表 3 热性能

| 项目            | 试验条件                            | A类（SiC/SiC） | B类（莫来石基） | C类（氮化硅基） |
|---------------|---------------------------------|-------------|----------|----------|
| 热震后弯曲强度保留率/%  | 1200℃室温，水冷                      | ≥70         | ≥70      | ≥70      |
| 热循环寿命/次       | 室温升至1200℃，升降温<br>50℃/min，保温5min | ≥50         | ≥50      | ≥50      |
| 热循环后弯曲强度保留率/% | 室温升至1200℃，升降温<br>50℃/min，保温5min | ≥60         | ≥60      | ≥60      |

5.6 环境性能

表 4 环境性能

| 项目         | 试验条件                          | A类（SiC/SiC涂层材） | B类（莫来石基涂层材） | C类（氮化硅基涂层材） |
|------------|-------------------------------|----------------|-------------|-------------|
| 氧化后弯曲强度保留率 | 1500℃空气，50h                   | ≥70%           | —           | —           |
| 盐雾后弯曲强度保留率 | 5% NaCl 中性盐雾，<br>35℃±2℃，1000h | ≥90%           | ≥90%        | ≥90%        |

5.7 无损检测

产品所有部位经全套无损检测，关键部位缺陷尺寸、数量及涂层脱粘面积需满足更严苛限值，非关键部位缺陷控制指标适度放宽，整体不允许出现裂纹、分层等致命缺陷，气孔、内部孔洞、涂层脱粘等缺陷均不得超出对应部位允许阈值。

5.8 可重复使用性能

复合材料制成的部件经模拟真实工况的发射—回收—检修循环后，应满足：

- a) 10 次循环后，弯曲强度保留率≥80%，无损检测结果符合 5.7 规定；
- b) 20 次循环后，弯曲强度保留率≥70%，无损检测结果符合 5.7 规定；
- c) 30 次循环后，弯曲强度保留率≥60%，无损检测结果符合 5.7 规定。

6 试验方法

6.1 原材料检验

6.1.1 增强体

SiC 纤维抗拉强度、弹性模量及直径按 GB/T 34559 测定。

6.1.2 基体

基体纯度采用电感耦合等离子体发射光谱法测定，粒度采用激光粒度仪测定，SiC 和氮化硅基体密度按 GB/T 25995 测定。

### 6.1.3 界面相

界面相及涂层厚度采用扫描电子显微镜（SEM）截面法，随机测量 5 个点取算术平均值。

### 6.1.4 抗氧化涂层

涂层结合强度按 GB/T 30707 规定的划痕法测定。

## 6.2 外观与尺寸检验

表面缺陷采用目视法检查，必要时使用 5 倍放大镜辅助；表面粗糙度采用接触式粗糙度仪，在制品表面随机选取 3 个位置测量取平均值；尺寸及形位公差采用卡尺、千分尺或三坐标测量仪测定，测量精度符合设计要求。

## 6.3 物理性能试验

6.3.1 密度和显气孔率按 GB/T 25995 规定的进行。

6.3.2 热导率按 GB/T 22588 规定的激光闪射法进行。

6.3.3 热膨胀系数按 GB/T 16535 规定的顶杆法进行，测试温度范围室温至 1200℃，升温速率 5℃/min，试样尺寸  $\phi 5\text{mm} \times 25\text{mm}$ ，数量  $\geq 3$  个。

## 6.4 力学性能试验

6.4.1 室温拉伸性能按 GB/T 23805 进行。

6.4.2 高温拉伸性能按 GB/T 36264 进行（1200℃空气环境，保温 30min），建议采用 I 型试样或 II 型试样，标距长度 25 mm，加载速率 0.5 mm/min，试样数量  $\geq 5$  个。

6.4.3 室温弯曲强度按 GB/T 6569 进行。

6.4.4 高温弯曲强度按 GB/T 14390 进行（1200℃空气环境，保温 30min），采用三点弯曲法，试样尺寸  $3\text{mm} \times 4\text{mm} \times 40\text{mm}$ ，跨距 30mm，加载速率 0.5mm/min，试样数量  $\geq 5$  个。

6.4.5 压缩强度按 GB/T 8489 进行，试样尺寸  $\phi 10\text{mm} \times 10\text{mm}$ ，加载速率 0.5mm/min，试样数量  $\geq 5$  个。

6.4.6 层间剪切强度按 GB/T 1450.1 规定的三点弯曲法进行，试样尺寸  $2\text{mm} \times 6\text{mm} \times 30\text{mm}$ ，跨距 16mm，加载速率 0.5mm/min，试样数量  $\geq 5$  个。

## 6.5 热性能试验

6.5.1 热震性能按 GB/T 37246 规定的水冷法进行，测试热震前后弯曲强度计算保留率，试样数量  $\geq 5$  个。

6.5.2 热循环性能采用高温管式炉进行，试验条件符合 5.5.3 要求，测试循环前后弯曲强度计算保留率，试样数量  $\geq 5$  个。

## 6.6 环境性能试验

6.6.1 抗氧化性能试验采用高温气氛炉开展静态空气氧化试验，将试样置于炉内，升温至 1500℃并保温 50h，试验结束后随炉冷却至室温。分别检测试样氧化前后的弯曲强度，计算试样弯曲强度保留率，试样数量不少于 3 个。。

6.6.2 抗盐雾性能按 GB/T 10125 规定的中性盐雾试验法进行，试验条件符合 5.6.2 要求，测试盐雾试验前后弯曲强度计算保留率，试样数量  $\geq 3$  个。

## 6.7 无损检测

应按照GB/T 18851.1的规定进行检测。

## 6.8 可重复使用性能试验

采用模拟发射—回收综合环境试验台进行，试验条件应包含热循环、烧蚀、振动载荷等真实工况要素，具体参数由供需双方商定。每完成10 次循环后，进行一次无损检测和弯曲强度测试。

7 检验规则

7.1 检验分类

产品检验分为出厂检验和型式检验。

7.2 出厂检验

7.2.1 每批产品由同一原材料、同一工艺、同一规格生产的产品组成，批量≤50 件。

7.2.2 检验项目：外观质量、尺寸公差、密度、无损检测。

7.2.3 判定规则：所有检验项目均符合本文件规定时，判定该批产品合格。致命缺陷不允许复验，直接判定不合格。一般缺陷允许从同一批中加倍抽样复验，复验仍不合格，则判定该批产品不合格。

7.3 型式检验

7.3.1 有下列情况之一时，应进行型式检验：

- a) 新产品定型或老产品转厂生产时；
- b) 原材料、生产工艺有重大改变，可能影响产品性能时；
- c) 正常生产每满 1 年时；
- d) 停产半年以上恢复生产时；
- e) 国家质量监督机构提出要求时。

7.3.2 从出厂检验合格的产品中随机抽取 3 件进行检验，检验项目为本文件规定的全部技术要求。

7.3.3 判定规则：所有检验项目均符合本文件规定时，判定型式检验合格。致命缺陷不允许复验，直接判定不合格，一般缺陷允许加倍抽样复验，复验仍不合格，则判定型式检验不合格。

8 标志、包装、运输和贮存

8.1 标志

产品包装上应有清晰、持久的标志，内容包括：产品名称和标记、批号、生产日期、生产单位名称和地址、合格标识，以及 GB/T 191 规定的防潮、防震、向上等图示标志。

8.2 包装

产品采用泡沫塑料衬垫进行缓冲包装，外层使用木质包装箱封装。对于尺寸精度要求高于 IT 10 级的精密构件，应采用真空包装。包装应牢固可靠，满足防潮、防震、防碰撞要求。

8.3 运输

产品运输过程中应避免剧烈振动、碰撞和雨淋。装卸作业时应轻拿轻放，严禁抛掷。

8.4 贮存

产品应贮存在干燥、通风、无腐蚀性气体的环境中，远离热源和火源。产品应平放，避免堆叠挤压。贮存期限为 2 年，超过贮存期限需重新进行无损检测 and 关键性能检验，合格后方可使用。