

# T/CASME

团 体 标 准

T/CASME XXX—2025

## 增材制造碳化硅基陶瓷光固化成型工艺与 技术规范

The additive manufacturing process and technical specifications for  
silicon carbide-based ceramic photocuring molding

（征求意见稿）

2025 - XX - XX 发布

2025 - 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 原材料要求 ..... 1

5 设备系统 ..... 2

6 操作人员、环境与安全 ..... 3

7 工艺过程 ..... 3

8 质量检验 ..... 6

9 技术资料交付 ..... 6

附录 A（规范性） 碳化硅基陶瓷光固化成型工艺流程 ..... 7

## 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。

本文件由东莞理工学院提出。

本文件由中国中小商业企业协会归口。

本文件起草单位：东莞理工学院

本文件主要起草人：……

# 增材制造碳化硅基陶瓷光固化成型工艺与技术规范

## 1 范围

本文件规定了增材制造碳化硅基陶瓷光固化成型工艺的原材料要求、设备系统、操作人员、环境和安全、工艺过程、质量检验、技术资料交付。

本文件适用于增材制造碳化硅基陶瓷光固化成型的工艺。

## 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 9103 工业硬脂酸
- GB 14554 恶臭污染物排放标准
- GB 26503 快速成形机床 安全防护技术要求
- GB/T 35022—2018 增材制造 主要特性和测试方法 零件和粉末原材料
- GB/T 35351 增材制造 术语
- GB/T 35493 钛酸酯偶联剂
- GB/T 37698 增材制造 设计 要求、指南和建议
- QB/T 2153 工业油酸

## 3 术语和定义

GB/T 35351界定的术语和定义适用于本文件。

## 4 原材料要求

### 4.1 碳化物陶瓷体系

- 4.1.1 应采用（Ta，Hf）C-SiC 的复相陶瓷作为原材料。
- 4.1.2 复相陶瓷原材料的基本特性数据应由供应商提供，主要包括以下特性：
  - 粉末粒度及分布；
  - 形状和形态；
  - 颗粒分散状态；
  - 比表面积；
  - 最大吸附值（高效液相色谱）；
  - 密度（振实密度、松装/表观密度）；
  - 流动性；
  - 透光率；
  - 折射率；

- 结晶温度；
- 玻璃化转变温度等。

注：可采用傅里叶红外光谱分析仪表征改性机理。

## 4.2 光固化树脂体系

### 4.2.1 组成要求

光固化树脂体系是引发光敏聚合反应的基础，主要包括树脂单体、分散剂、光引发剂和助剂等。

### 4.2.2 性能要求

- 4.2.2.1 光固化树脂应与陶瓷粉末间具有良好的润湿性，与陶瓷粉末混合后可形成较稳定的胶体浆料。
- 4.2.2.2 光固化树脂体系应满足在常温下呈液态，并在特定波长光照射下能够迅速固化。
- 4.2.2.3 光固化树脂应满足在低于陶瓷烧结温度下能分解成气体排出陶瓷坯体。

### 4.2.3 树脂单体

树脂单体的基本特性数据应由供应商提供，主要包括以下特性：

- 黏度；
- 光敏度；
- 固化收缩率；
- 固化速率；
- 溶胀；
- 临界曝光量；
- 透射深度；
- 液态密度；
- 折射系数；
- 开启包装后的最长使用时间等。

### 4.2.4 分散剂

分散剂应具有使陶瓷颗粒均匀分散于光固化浆料中，并稳定浆料、降低粘度的作用。

### 4.2.5 光引发剂

光引发剂应满足吸收特定波长光后引起树脂单体迅速交联并固化，形成包含有陶瓷颗粒的固态聚合物网状基质。

## 5 设备系统

### 5.1 系统组成

碳化硅基陶瓷光固化成型设备应至少包含激光器、控制系统、光束聚焦扫描系统、供料系统、铺料系统、升降工作台等。

### 5.2 要求

- 5.2.1 光固化成型设备的检验、验收应符合设备厂商或相关标准要求。
- 5.2.2 光固化成型设备交付前应有合格证明文件，且各项技术指标参数符合工艺相关要求。

5.2.3 设备使用说明文件应包含定期检查的项目、周期和标准。

5.2.4 用于光固化成型工艺过程的仪器仪表应按国家或企业的有关规定定期计量检定、校准。

## 6 操作人员、环境与安全

### 6.1 操作人员

操作者应接受培训，内容包括但不限于增材制造设备和辅助设备的操作、维护、校准、软件使用、安全防护、材料处理、后处理、数据处理、异常情况处理等。

### 6.2 环境

6.2.1 工艺操作的温度、湿度应保持在规定范围内，光敏树脂及制件应隔绝自然光，防止变性。

6.2.2 生产过程产生的污染物排放应符合 GB 14554 的规定。

### 6.3 安全

6.3.1 设备的安全防护应符合 GB 26503 的规定。

6.3.2 设备区域及制件处理区域不应采用含紫外光的照明设备。

## 7 工艺过程

### 7.1 工艺流程

碳化硅基陶瓷光固化成型工艺流程见附录A。

### 7.2 模型设计

7.2.1 应按照 GB/T 37698 的规定进行模型设计，模型文件应能转化为设备可识别的格式。可通过逆向扫描输入三维建模软件实现零件模型建立或直接通过三维建模软件建立零件模型。

7.2.2 在进行模型设计时应符合以下规定：

- 采用静动态法、三点抗弯法、单边切口梁法和压痕法等分别对负载有平行电极的料槽不同旋转角度与短切碳纤维增韧补强复相陶瓷的弹性模量、抗弯强度、断裂韧性和硬度等力学性能进行分析评价，并通过韦布尔模数评估材料的离散型和可靠性；
- 对不同载荷下料槽在单层不同旋转角度的应力分布进行模拟；
- 在不同载荷条件下，通过对碳化硅陶瓷的组分调节、显微结构剪裁及烧结动力学调控热膨胀系数、弹性模量并同时控制多元组分的层厚，调控适于服役条件下的界面应力；
- 建立界面应力与力学性能之间的映射关系模型或数学力学模型，保证界面应力与陶瓷的材料成分、外加载荷、层厚等参数之间存在最优关系；
- 建立增材制造层间界面应力协同强韧效应、碳纤维材料的尺度强韧效应和增材制造层状陶瓷材料力学性能之间的映射关系模型或数学力学模型。

7.2.3 模型摆放位置设计符合以下原则：

- a) 模型沿成型和升降平台的中心区域摆放，成型和升降平台边缘应留有适当间距；
- b) 根据成型区域确定合适的模型数量，相邻模型应间留有适当间距，防止干涉。

7.2.4 模型支撑添加设计符合以下原则：

- a) 需要添加支撑的悬空部位，在不影响使用性能的前提下，悬空模型与底平面的夹角宜大于  $35^{\circ}$ ；
- b) 添加支撑的角度宜为  $45^{\circ}$ ，可根据模型结构进行调整；

c) 结构复杂的模型面宜朝上摆放,模型弧形面与底平面成 $45^{\circ}$ 摆放或直立摆放。

### 7.3 数据处理

7.3.1 设计完成的数据模型在软件中导出的文件格式应为 STL 等切片软件支持的三维格式类型,并在软件中进行检测,检测对象包含但不限于法向方向、三角面片质量、最小壁厚。

7.3.2 切片分层处理时,根据成型设备参数,选择合适的切片厚度,预判成型时间,形成成型文件。

### 7.4 陶瓷材料预处理

#### 7.4.1 陶瓷体系改性

制备陶瓷浆料前,应采用甲基丙烯酰氯对 (Ta, Hf) C-SiC 复相陶瓷粉体进行表面接枝改性。并按以下要求进行检测:

- 采用高分辨透射电镜 (HRTEM) 表征被包覆粉体的形貌及分散状态;
- 采用粒度分布仪和比表面分析仪分别表征粒度分布和比表面积;
- 采用高性能液相色谱仪测定不同碳链长度的表面改性剂的最大吸附值。

#### 7.4.2 陶瓷浆料制备

7.4.2.1 制备陶瓷浆料时宜对陶瓷粉体进行改性处理,针对不同改性目的,宜进行以下处理:

- 采用符合 GB/T 9103 要求的不同含量硬脂酸对陶瓷粉体进行预改性,在陶瓷粉体颗粒表面形成稳定且厚度可控的包覆层,以改善陶瓷粉体和有机粘结剂的相容性;
- 采用符合 QB/T 2153 要求的油酸对氧化锆粉体进行预改性,以打破粉体团聚,抑制烧结过程中异常晶粒长大;
- 采用符合 GB/T 35493 要求的钛酸酯偶联剂进行预改性,以降低烧结温度。

7.4.2.2 应通过球磨、超声、搅拌等方法将陶瓷粉末与液态光敏树脂混合均匀。

7.4.2.3 打印前应调整陶瓷粉末在混合液中的固体颗粒含量,应控制混合液粘度、悬浮液体积比、折射系数、陶瓷粉末颗粒大小等相关物理量。

### 7.5 参数设定

应根据光敏树脂的性能、制件加工需求和工艺参数包等因素设计工艺参数。工艺参数包括但不限于:

- 曝光层厚;
- 曝光时间;
- 曝光强度;
- 树脂回流等待时间;
- Z 轴移动速度。

### 7.6 光固化成型

#### 7.6.1 开机前的检查

7.6.1.1 检查光路、成型和升降平台、树脂槽,应无异物。

7.6.1.2 检查 Z 轴成型和升降平台, Z 轴成型和升降平台平整度应符合要求。

#### 7.6.2 设备自检

开启设备自检程序,各设备应处于完好状态。

#### 7.6.3 成型过程

- 7.6.3.1 应对主要工艺参数进行记录，具体的工艺参数监控和记录由供需双方协商确定。
- 7.6.3.2 成型过程中若出现报警、中断等异常，应对异常进行记录和评估，并根据评估结果进行处置。
- 7.6.3.3 在成型过程中，宜关注制件与成型和升降平台是否出现粘连、位移情况，发现粘连或位移应及时处理。

#### 7.6.4 制件取出

成型结束后，将制件的光敏树脂液体滴淋干净后再取出制件。

### 7.7 初检查

- 7.7.1 目视检查制件，宏观外表不应有变形、错层、缺失等缺陷。
- 7.7.2 可通过显微结构演变、气孔演变和烧结动力学的角度检查制件，微观结构不应有坍塌、变形的缺陷。
- 7.7.3 在不影响预期要求的情况下，宏观外表宜通过对制件采用修补、变形校正、机械加工等方式进行修复；微观结构宜采用冷等静压后处理的方式进行修复。

### 7.8 后处理

#### 7.8.1 清理

应使用高压清洗机、超声清洗机、高压气、防静电毛刷等方法对成型后的坯体进行清洁。

#### 7.8.2 去除支撑

去除支撑时，不应损坏制件本身。

### 7.9 脱脂烧结

#### 7.9.1 工艺参数

陶瓷坯体脱脂及烧结工艺参数应通过试验确定。工艺参数包括但不限于：

- a) 升温速率；
- b) 最高温度；
- c) 保温时间。

注：烧结温度建议控制在1600℃。

#### 7.9.2 脱脂要求

- 7.9.2.1 脱脂后零件中的光敏树脂等有机物去除率应大于99%。
- 7.9.2.2 脱脂烧结后的固体成型件不应产生裂纹、气孔、夹生和翘曲变形等缺陷。

#### 7.9.3 烧结方法

陶瓷零件的烧结应根据陶瓷特性与使用需求等选择不同的烧结方法，主要包括常压烧结、真空烧结、气压烧结、热压烧结、热等静压烧结、微波烧结、放电等离子体烧结、自蔓延致密化烧结等方法。

### 7.10 表面处理

烧结后按供需双方协商，使用抛光机、手工打磨、上色机等方法对固体成型件表面进行后处理。

注：表面处理过程中应与三维模型对照，不应破坏成型件本身结构。

## 8 质量检验

8.1 成品交付前应进行质量与性能检验，由供需双方协商确定抽样方式、检测项目和技术指标作为交付及验收条件。

8.2 通过光固化增材制造工艺制备的成品主要包括以下特性：

- 表面特性：外观、表面粗糙度、颜色、光透性等；
- 几何特性：尺寸、长度及角度公差、几何公差等；
- 机械特性：维氏硬度、断裂韧性、弹性模量、压缩性能、拉伸性能、弯曲性能、冲击性能、疲劳性能、摩擦性能等；
- 其他特性：密度、气孔率、耐热性、抗热震性能等。

8.3 成品检验方法按 GB/T 35022—2018 中陶瓷材料的规定进行。

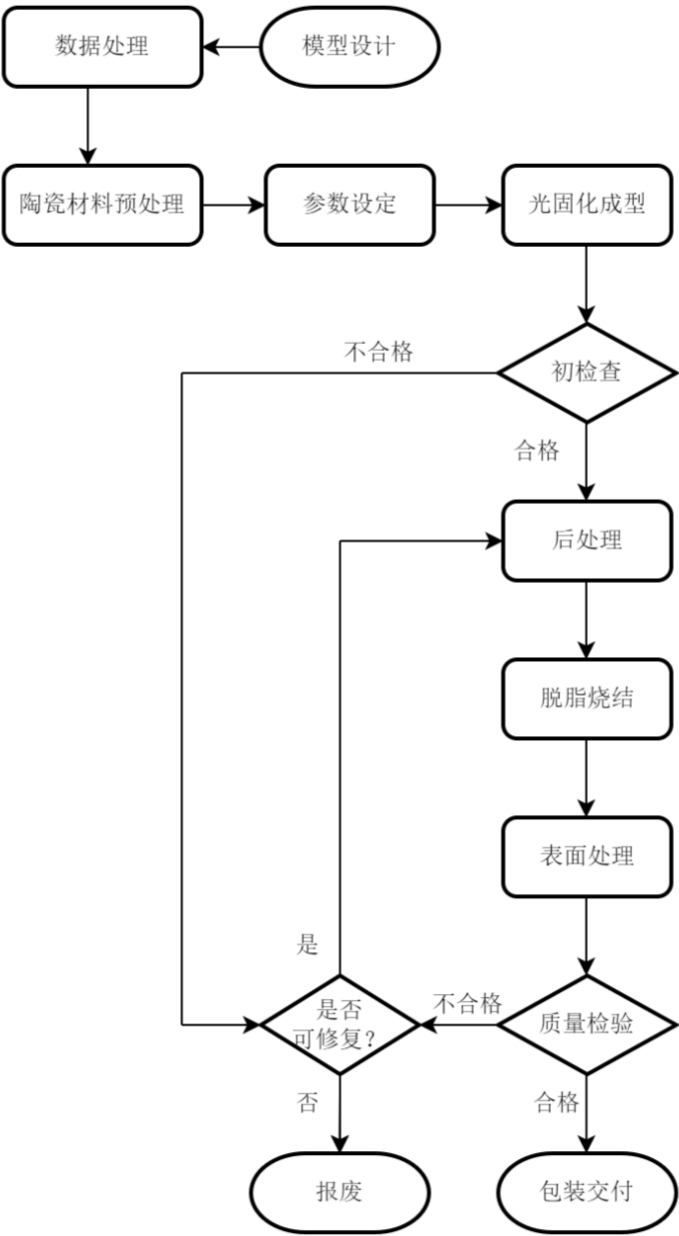
## 9 技术资料交付

随制件交付的技术资料应包括但不限于：

- 供应商信息（名称、地址和联系方式）；
- 制件名称；
- 合格证明文件；
- 产品标准编号；
- 制件数量；
- 生产日期；
- 产品包装、运输、贮存要求。

附 录 A  
(规范性)  
碳化硅基陶瓷光固化成型工艺流程

碳化硅基陶瓷光固化成型工艺流程见图A. 1。



图A. 1 碳化硅基陶瓷光固化成型工艺流程图