

ICS XXXXXX

CCS X XXX

# 团 体 标 准

T/CIECCPA XXX—2024

## 钛合金构件激光定向能量沉积增材制造技术规范

Additive manufacturing specification for titanium alloy  
components by laser-directed energy deposition

(征求意见稿)

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

中国工业节能与清洁生产协会发布



## 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 一般要求 .....	2
5 工艺过程 .....	3
6 质量检验 .....	6
7 技术资料交付 .....	6
附录 A 工艺参数对成形及质量的影响 .....	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。

本文件由中国工业节能与清洁生产协会提出并归口。

本文件起草单位：。

本文件主要起草人：。

# 钛合金构件激光定向能量沉积增材制造技术规范

## 1 范围

本文件规定了钛合金构件激光定向能量沉积工艺的一般要求、工艺过程、质量检验和技术资料交付。本文件适用于以激光为能量源的钛合金构件定向能量沉积工艺。

## 2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是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 3620.1 钛及钛合金牌号和化学成分
- GB/T 3620.2 钛及钛合金加工产品化学成分允许偏差
- GB/T 11651 个体防护装备选用规范
- GB 15577 粉尘防爆安全规程
- GB/T 15605 粉尘爆炸泄压指南
- GB 25493 以激光为加工能量的快速成形机床安全防护技术要求
- GB/T 35022 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 37698 增材制造设计要求、指南和建议
- GB/T 39247 增材制造金属制件热处理工艺规范
- GB/T 39254 增材制造金属制件机械性能评价通则
- GB/T 42622 增材制造激光定向能量沉积用钛及钛合金粉末
- GB 50019 工业建筑供暖通风与空气调节设计规范
- AQ 4273 粉尘爆炸危险场所用除尘系统安全技术规范

## 3 术语和定义

GB/T35351 界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

### 3.1 沉积层 deposited layer(s)

工作状态下，原材料在激光的作用下熔化，并在构件工作表面上沉积的凝固层。

### 3.2 沉积道 track / bead

工作状态下，原材料与激光束的汇聚点做单次非折线运动时所沉积的区域。

### 3.3 沉积路径 path

工作状态下，原材料与激光束的汇聚点的移动路径。

### 3.4 搭接率 patch rate

正常工艺状态下，相邻沉积道部分区域重合的宽度与单沉积道宽度的比率。

### 3.5 送粉率 feeding rate

单位时间内，通过送料系统送出的钛合金粉末原材料重量或体积。

3.6

**基材 substrate**

用于构件沉积的板材或块材。基材材料与工件材料一致时，也可以作为本体的一部分。

3.7

**沉积头 nozzle**

将激光能量和粉末原材料输送到熔池的装置。

3.8

**切片厚度 layer thickness**

模型切片过程中设计的激光定向能量沉积过程沿沉积方向的单沉积层厚度。

3.9

**随炉样品 furnace sample**

在零件或实物构件成形的同时，额外制备的同制造批次样坯或试样。

## 4 一般要求

### 4.1 人员

操作者应接受培训，考核合格后持证才能操作设备，培训应由设备厂商或已接受培训并合格的人员来实施。

注：培训内容包括但不限于粉末床熔融设备和辅助设备的操作、维护、校准、软件使用、安全防护、原材料处理、后处理、数据处理、异常情况处理等。

### 4.2 设备

#### 4.2.1 概述

激光定向能量沉积设备主要由激光器、沉积头、粉末原材料输送系统、气氛控制系统、运动控制系统、除尘系统、循环过滤系统、过程监控系统等部分组成。

#### 4.2.2 要求

4.2.2.1 激光定向能量沉积设备的检验、验收应符合设备厂商或相关标准要求，同时满足国家相关安全和环境保护的要求。

4.2.2.2 激光定向能量沉积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。

4.2.2.3 设备使用说明文件应包含定期检查的项目、周期和标准。

4.2.2.4 用于激光定向能量沉积工艺过程的仪器仪表应按国家、企业的有关规定定期计量检定、校准。

### 4.3 原材料

#### 4.3.1 概述

激光定向能量沉积工艺的原材料为金属粉末。

#### 4.3.2 性能

金属粉末的主要性能指标包括：化学成分、粒度及粒度分布、流动性、氧含量、球形率、松装密度、空心粉率等。金属粉末的牌号和化学成分应符合 GB/T 3620.1、GB/T38972 或其他相关标准要求，或者在制造前由供需双方协商确定。金属粉末检验指标应根据工艺要求确定，其他特殊要求需供需双方协商

确定。检验方法应按照 GB/T 35022 规定的要求或供需双方协商确定的其他标准执行。

#### 4.3.3 重复使用

使用过的粉末过筛后经检测不符合 4.3.2 的要求时，由供需双方协商确定其使用或采用 GB/T 35027 中规定的环保方式处理，符合 4.3.2 的要求时可重复使用，但重复使用的钛合金粉末应征得用户同意或者认可。

#### 4.3.4 污染防护

参考 GB/T 38972 或其他相关标准，应采取必要措施防止粉末在使用、贮存、运输、筛分（粉末）、清理等过程中被污染。

#### 4.3.5 交付及贮存

4.3.5.1 材料供应商应根据 GB/T 3620.1、GB/T 38972 或其他相关标准要求提供相关粉末的安全技术说明书和质量证明文件，质量证明书应包括牌号、批号、生产日期以及相关检测指标的检测结果。

4.3.5.2 粉末应有效密封在密闭、静电防护（当粉末粒径 $\leq 100\mu\text{m}$  时）且阻燃的容器内，并存放在干燥、阴凉、无腐蚀的环境下。

### 4.4 环境

#### 4.4.1 温度和湿度

推荐的设备工作环境温度为 5°C-35°C，湿度 $\leq 75\%$ 。

#### 4.4.2 通风和照明

安装设备的场地应具备良好的通风和照明条件，应按照 GB/T 50019 的规定执行。

### 4.5 安全

4.5.1 以激光为能量源的定向能量沉积设备安全防护应符合 GB 25493 第 5.3、5.7 条的规定，并需安装氧浓度检测仪。氧浓度检测仪应安装在接近有潜在惰性气体泄漏的位置，例如阀门以及管道连接处，并应定期进行计量检定、校准或替换，并有校准或替换记录。

4.5.2 以激光为能量源的定向能量沉积设备成形室的防爆泄压装置应符合 GB/T 15605 第 10 条的规定。

4.5.3 粉末在运输、贮存、清理、筛分等过程中的操作及相关设备防爆安全应符合 GB 15577 的规定。

### 4.6 人员防护

4.6.1 粉末在使用、贮存、清理、筛分时，操作人员应按照 GB/T 11651 的规定使用个体防护用品。

4.6.2 必要时，建议在使用保护气体的操作场所为操作人员配备呼吸保护装置。

## 5 工艺过程

### 5.1 流程图

典型的钛合金构件激光定向能量沉积工艺流程如图 1 所示，最主要流程分为前处理、增材成形、后处理、质量检验。前处理包括原材料、设备、工装等硬件耗材的确认以及模型的处理、工艺参数的设置；后处理包括去支撑、机加、表面处理等过程。

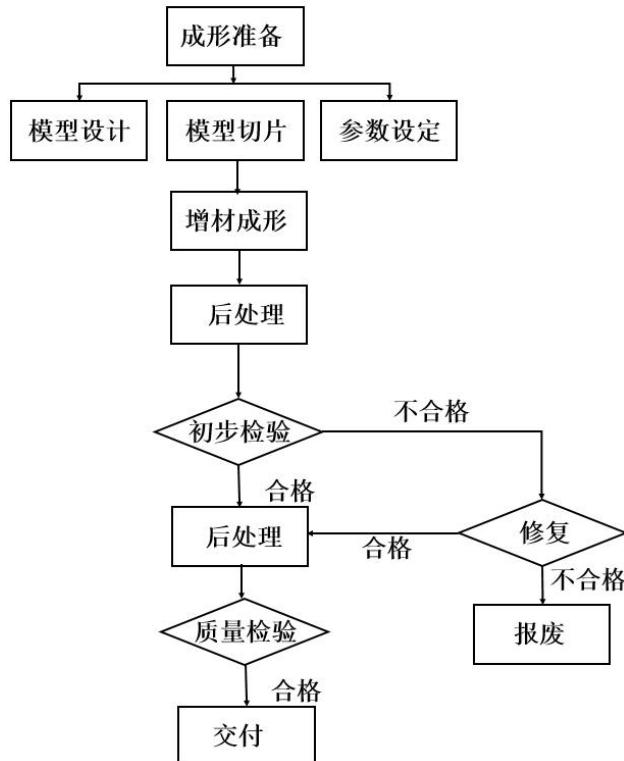


图1 典型工艺流程图

## 5.2 成形准备

### 5.2.1 原材料准备

用于成形制造的粉末材料应符合 4.3.2 的要求。

在每次粉末更换时，需核对粉末质量证明文件，对粉末牌号、批号、粉末使用和保存状态及相关检测指标的检测结果进行记录。为保证粉末流动性，可对粉末进行烘干等操作，确认符合制造工艺要求。

每次成形前需根据模型计算粉末用量。

### 5.2.2 设备准备

#### 5.2.2.1 设备状态确认

对激光定向能量沉积设备激光器、沉积头、（粉末）原材料输送系统、气氛控制系统、运动控制系统、除尘系统、循环过滤系统、过程监控系统等各系统状态以及水、电、气进行确认，保证设备状态符合成形需求。

粉末原材料添加前应将成形设备及烘干设备内的粉末清理干净，避免不同牌号或批次的原材料混合造成污染。

#### 5.2.2.2 基材、工装准备

基材、工装按以下要求准备：

- 基材应采用与原材料同牌号或冶金相容性较好的材料。如基材部分或整体将作为最终零件的一部分，基材原则上应采用与原材料同牌号的钛合金材料。
- 基材应平稳放至设备成形平台合适位置，并安装固定。
- 基材厚度、表面平整度应满足制造工艺要求，使用前按照成形需求选择合适规格的基材。基材、工装使用前应清除表面杂质、油污，保持表面干燥，如有表面粗糙度要求，应进行喷砂等表面处理。

d) 调整基材表面与沉积头喷嘴之间的距离至可成形范围。成形工装的选用应满足安全易用、且与沉积头互不干涉的原则。

e) 基材和工装的选择应考虑结构刚度，保证沉积过程中由于热应力引起的基材、工装变形在允许范围内。

### 5.2.2.3 程序检查

设置设备工作原点，运行加工程序进行空程检查，确保第一层或前数层运行轨迹落在基材幅面范围。

### 5.2.2.4 气氛控制

开启设备气氛保护或隔离程序，控制成形室气氛满足成形要求，要求氧含量 $<100\text{ppm}$ 。

## 5.3 模型设计

5.3.1 对实体进行扫描并输入三维建模软件实现模型建立或直接通过三维建模软件建立零件模型。

5.3.2 模型设计时应包含加工余量，同时宜包含随炉样品、直接取样的取样位置、沉积路径等。

5.3.3 沉积路径应根据零件的数量、结构、性能要求、成形时间等因素确定。

5.3.4 零件的模型设计应符合 GB/T 37698 的有关规定。

## 5.4 模型切片

5.4.1 零件模型文件应能够转换为定向能量沉积系统可读取的格式，如 STL、NC 或 AMF 格式等。

5.4.2 应根据定向能量沉积工艺选取相应的切片厚度，切片数据转换为定向能量沉积系统所能识别的运动和过程控制数据，通常包括轮廓和填充数据等。

## 5.5 参数设定

根据材料和零件结构性能要求设置相应参数，可参考设备制造商提供的工艺参数包，主要成形工艺相关参数如下：

激光功率、扫描速率、送粉 / 送丝速率、束斑尺寸、搭接率、沉积道宽度、沉积层高度等；

## 5.6 增材成形过程

5.6.1 成形过程由计算机辅助完成，操作人员主要进行过程巡查和问题处理。

5.6.2 应对主要工艺参数进行监控和记录，相关工艺参数自动记录和存储。成形过程中允许通过手动控制或反馈控制对工艺参数进行适当调整，具体的工艺参数监控和记录由供需双方协商确定。

5.6.3 成形过程中如出现中断，应对中断状态进行记录和评估，并根据评估结果进行处置。

5.6.4 对于有特殊要求的零件，可在成形过程中设定中断点，进行去应力退火。

5.6.5 工艺参数对零件成形过程和质量的影响见附录 A。

## 5.7 清理

5.7.1 成形完成后宜将零件在保护气氛或真空环境下冷却到环境温度或者特定温度下再进行清理。

5.7.2 粉末清理可采用防静电毛刷、防爆吸尘器、高压气等进行清理。粉末清理过程中不应损坏零件。

5.7.3 清理粉末操作过程中的安全及人身防护应符合 4.5、4.6 的要求。

## 5.8 初步检验

5.8.1 成形完成后对零件进行初步检验，包括但不限于外观缺陷、外形尺寸等检验。

5.8.2 在不影响客户预期使用要求情况下，可以通过对零件采用修补、变形校正、机械加工等补救方式来满足要求。

## 5.9 后处理

### 5.9.1 总则

后处理通常有零件移除、表面处理、热处理等，供方应根据需方的要求选择合适的后处理方法。

### 5.9.2 零件移除

从基材上移除零件时不应破坏零件和影响零件性能。常用的零件移除方法有电火花切割、机械加工、手工去除等。

### 5.9.3 表面处理

成形后的零件表面是否需要处理由供需双方协商确定，常见的表面处理方法有喷砂、打磨、抛光、精磨、机械加工、电化学腐蚀等。

### 5.9.4 热处理

5.9.4.1 成形后的零件可根据需要进行去应力退火处理，注意变形控制。

5.9.4.2 根据零件的使用要求或供需双方的技术协议采用相应的热处理以改善组织性能。

5.9.4.3 对内部质量有特殊要求的零件可进行热等静压处理。

5.9.4.4 试样应与零件同炉热处理。

5.9.4.5 热处理应符合 GB/T39247 的有关规定。

## 6 质量检验

### 6.1 要求

6.1.1 零件交付前应进行必要的质量检验，由供需双方协商确定抽检方式、检测项目以及技术指标作为交付和验收条件。

6.1.2 零件主要特性和测试方法应满足但不限于 GB/T35022 的规定。

6.1.3 零件机械和力学性能评价应符合 GB/T39254 的规定。

### 6.2 复检

需方可根据双方协定的要求进行复检，复检结果不合格时，由供需双方协商解决。

## 7 技术资料交付

交付的零件应包含但不限于以下信息：

- a) 供应商信息（名称、地址和联系方式）零件名称和材料牌号或成分；
- b) 零件合格证明文件；
- c) 执行标准编号；
- d) 零件数量；
- f) 生产日期；
- g) 后处理记录；
- h) 产品包装、运输、贮存等要求。

**附录 A**  
**工艺参数对成形及质量的影响**  
**(资料性)**

表 A.1 工艺参数对零件成形过程和质量的影响

工艺参数	描述	对零件成形过程和质量的影响
激光功率	激光器单位时间的输出能量	影响零件成形质量及成形效率等
扫描速率	激光在成形平面内的移动速度	影响零件成形质量及成形效率等
送粉率/送丝速率	粉末/丝材送进速率	影响零件成形质量及成形效率等
沉积道宽度	单道沉积宽度	影响零件成形微观组织、成形效率、尺寸精度等
沉积层高度	单层沉积层度	影响零件成形微观组织、成形效率、尺寸精度等
搭接率	正常工艺状态下，相邻沉积道部分区域重合的宽度与单道沉积道宽度的比率	影响零件成形质量和性能
束斑尺寸	激光光斑尺寸	影响沉积道宽度、成形质量和成形效率