

四川省地方标准

DB51/T 3349—2025

薄壁金属构件激光电弧增减材复合制造 工艺规范

2025-12-23 发布

2025-12-31 实施

四川省市场监督管理局 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 1

 4.1 人员 2

 4.2 设备 2

 4.3 原材料 2

 4.4 环境 2

 4.5 安全与防护 2

5 工艺过程 2

 5.1 工艺原理 2

 5.2 工艺流程 2

 5.3 模型处理 3

 5.4 仿真分析 3

 5.5 加工准备 3

 5.6 数据格式转换 4

 5.7 增减材加工 5

 5.8 清理 5

 5.9 后处理 5

 5.10 质量检验 6

参考文献 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这些专利的责任。

本文件由四川省经济和信息化厅提出、归口、解释并组织实施。

本文件起草单位：四川省增材制造技术协会、中国兵器装备集团自动化研究所有限公司、四川维嘉增材制造技术有限公司、太行国家实验室轻量化结构与材料制造研究部、南京英尼格玛工业自动化技术有限公司、中国航发航空科技股份有限公司、中国核动力研究设计院、四川五八增材科技有限公司、重庆大学、西华大学、成都航空职业技术大学、成都工业学院、四川省康复辅具技术服务中心、测试狗（成都）实验检测有限公司、四川工程职业技术大学、西南交通大学、成都职业技术学院。

本文件主要起草人：王敏、王长春、雷力明、董巍、李湑、何戈宁、彭必友、许建均、张敬贤、胡戩、张舜、权国政、杨晨、徐磊、周海洋、门正兴、程远、张强、罗文波、吴代建、陈大勇、刘广志、张震、梁桃华、邓朝广、张振林、郭双全。

薄壁金属构件激光电弧增减材复合制造工艺规范

1 范围

本文件规定了薄壁金属构件激光电弧增减材复合制造工艺的一般要求和工艺过程。
本文件适用于薄壁金属构件激光电弧增材与机械铣削、打磨减材复合的制造。

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 10858 铝及铝合金焊丝
- GB/T 14896.7 特种加工机床 术语 第7部分：增材制造机床
- GB/T 35351 增材制造 术语
- GB/T 39247 增材制造 金属制件热处理工艺规范
- GB/T 39253-2020 增材制造 金属材料定向能量沉积工艺规范
- GB/T 43302 增材制造用钛及钛合金丝材
- GB/T 43481-2023 增材制造 三维工艺模型数据质量要求

3 术语和定义

GB/T 14896.7、GB/T 35351界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

薄壁金属构件 thin-walled metal component

在截面内最大的特征尺寸与壁厚之比较小的金属构件，通常是由薄板、薄壳或细长杆件组成。

3.2

减材加工头 subtractive manufacturing head

安装在运动机构上夹持减材加工工具，并为工具提供回转运动对已沉积层进行减材加工的部件。

3.3

激光电弧增减材复合制造 laser-arc additive and subtractive hybrid manufacturing (LASH)

采用增减材复合制造设备，以激光、电弧为热源的增材加工，结合铣削、打磨等减材加工交替进行的复合制造。

3.4

激光电弧耦合沉积头 laser-arc additive melting deposition print head

一种可以对激光、电弧进行热源耦合的增材制造打印头。

3.5

层间温度 interpass temperature

多层多道增材过程中，打印当前层时，上一层的最高温度。

4 一般要求

4.1 人员

4.1.1 工艺人员应具备激光电弧增减材复合制造工艺基础知识，熟悉激光电弧增减材复合制造设备操作，掌握完整工艺生产流程。

4.1.2 设备操作人员应接受相关培训，包括但不限于设备的操作、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，考核合格后方可上岗。

4.2 设备

4.2.1 通常包括但不限于激光器、电弧增材电源、激光电弧耦合沉积头、减材加工头、运动机构、转台、原材料输送系统、控制系统、除尘系统、冷却系统、增减材制造软件系统、过程监控系统、保护气系统、预热系统、测温系统、表面精度/尺寸精度检测系统、清洗打磨系统、温度控制系统等。

4.2.2 激光电弧增减材复合制造设备主要系统技术要求如下：

- 激光电弧耦合沉积头：应能承受电弧增材电源所输出的电流与电压，同时具备一种丝材或多种丝材交替的送丝要求及冷却功能；最大承受功率不小于激光器的最大输出功率；
- 减材加工头：应能够精确夹持减材加工工具，夹持精度需达到 $\pm 0.05\text{ mm}$ ，回转速度应可调节，调节范围根据不同加工任务而定；
- 控制系统：可带动激光电弧耦合沉积头、减材加工头全范围覆盖增材制造软件规划的区域；
- 除尘系统：具有实时处理增材过程烟尘的功能；
- 增减材制造软件系统：应具备对输入的结构数模进行区域划分、分层切片、路径规划、路径仿真、工艺规划、生成增减材程序等基本功能；
- 过程监控系统：硬件部分一般由电流电压传感器、熔池视觉传感装置、温度传感装置、气体流量传感装置、显示装置、存储装置等组成；软件部分一般由数据传感模块、显示模块、用户操作界面模块、数据库模块等组成；

4.2.3 激光器、运动机构、测温系统等，应定期进行校准与维护，校准周期不应超过12个月。

4.3 原材料

主要原材料为金属丝材。金属丝材的线径、化学成分、物理力学性能等指标应符合GB/T 10858、GB/T 43302的规定，并具有清晰、可追溯的生产批次信息。

4.4 环境

设备运行环境及周围环境应符合GB/T 39253-2020中5.4的规定。

4.5 安全与防护

工艺过程安全与防护应按照GB/T 39253-2020中5.5、5.6的相关规定执行。

5 工艺过程

5.1 工艺原理

激光电弧耦合沉积头按照给定的速度与轨迹运动，采用送丝的方式，在激光电弧耦合作用下进行熔化沉积，利用沉积补偿或减材加工改善尺寸精度，通过增减材交替完成薄壁零件复合制造。

5.2 工艺流程

典型的薄壁金属构件激光电弧增减材复合制造工艺流程如图1所示：

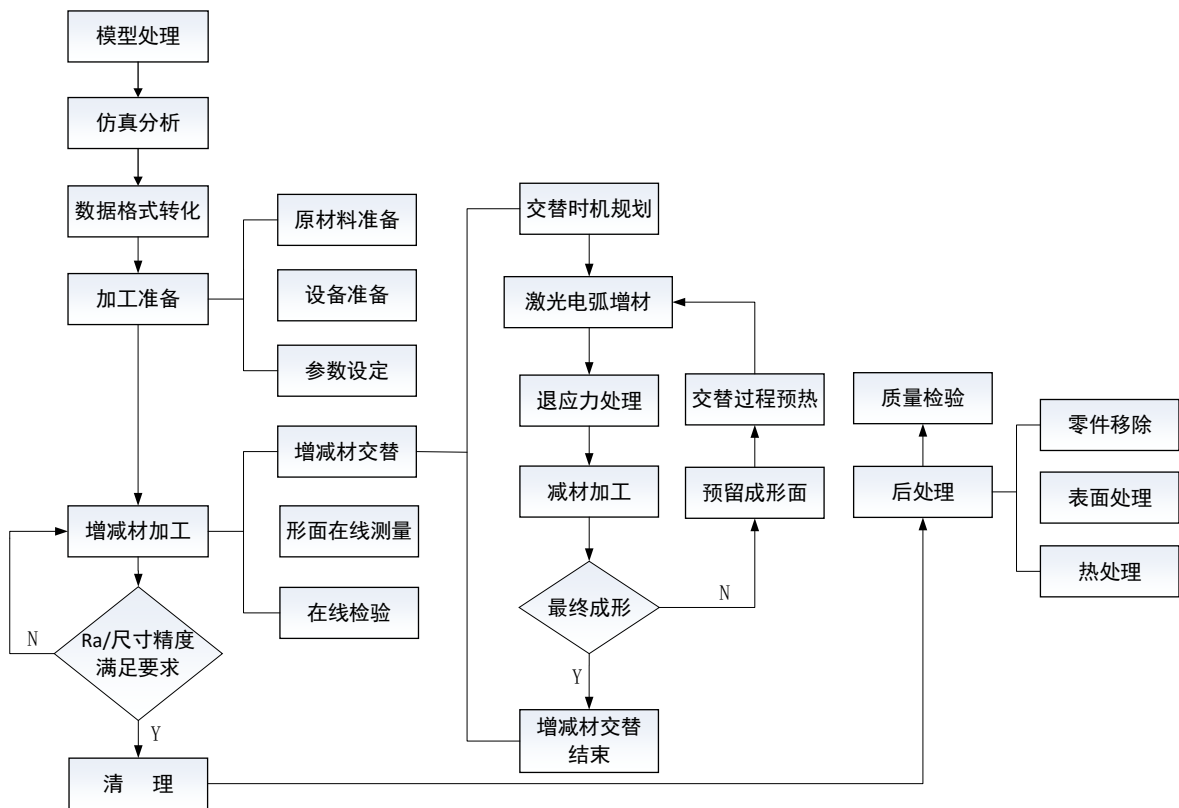


图1 典型的激光电弧增减材复合制造工艺流程

5.3 模型处理

模型处理要求如下：

- a) 通过三维建模软件或扫描实体模型完成建模；
- b) 根据工艺特点，通过工艺仿真补偿，对模型成形方向、摆放角度处理后，按需求进行分层切片与工艺规划；
- c) 根据实际沉积尺寸与设计尺寸对比，确定加工余量尺寸，规划减材工艺；
- d) 零件模型文件应转换为激光电弧增减材复合制造系统可读取的 STL、STP 等格式，应设置适宜的转换精度；
- e) 模型数据应符合 GB/T 43481-2023 中第 5 条相关的规定。

5.4 仿真分析

- 5.4.1 根据零件工艺特征，利用仿真分析软件对零件工艺过程进行仿真分析，获取加工过程温度、形变等信息。
- 5.4.2 已获取的规划路径要经仿真软件进行模拟和校核。

5.5 加工准备

5.5.1 原材料准备

5.5.1.1 金属丝材准备

准备要求如下：

——金属丝材应符合 4.3 的要求，必要时可对丝材进行烘干操作。

—— 每次更换金属丝材时应核对丝材的质量证明文件，记录金属丝材牌号、批号、使用日期等信息，丝材表面应无毛刺、凹坑等缺陷。

5.5.1.2 基材准备

根据零件材料种类及大小，选择合适的基材，使用前打磨表面氧化层并清洗干净。

5.5.2 设备准备

5.5.2.1 设备状态确认

对设备各系统状态进行全面检查确认。

5.5.2.2 气氛控制

根据材料特性或客户要求进行气氛控制，可在保护气氛或真空环境下进行制造。

5.5.2.3 温度控制

根据材料特性、客户要求或工艺过程要求，确定加工过程基材和层间温度控制要求，对于大尺寸或复杂结构的薄壁构件，宜采用分区预热或动态温控策略。

注：分区预热是指在增材制造过程中动态、有选择地对特定区域进行加热和控温。动态温控策略是指在增材制造过程中，根据实时反馈的温度场信息，对热输入进行连续、自适应、空间可变的精确调控。

5.5.3 参数设定

5.5.3.1 增材参数设定

根据设备特征及工艺要求设定激光功率、激光模式、电弧电压、电弧电流、扫描速率、送丝速率、材料类型、丝材直径、搭接率、零件预热温度、层间温度、保护气类型和流量、扫描路径、打印头位置姿态等参数。制造过程可通过反馈控制系统对工艺参数进行适时调整。

5.5.3.2 减材参数设定

根据设备特征、工艺要求、沉积层成形质量，设定加工路径、主轴转速、进给速率、进给量、工具规格、减材深度等参数。

5.6 数据格式转换

5.6.1 转换格式

将零件模型文件转换为激光电弧增减材复合制造系统可读取的格式，如G-code等。

5.6.2 其他参数设定

薄壁金属构件增减材制造过程，应根据零件特征及客户要求，设定基材预热温度、增减材交替层数、预热温度、预热时间、冷却温度、冷却时间、保持温度、保温时间、环境温度和湿度等参数。

5.6.3 数据记录

应记录加工过程中的各工艺参数，形成可追溯文件，有条件的可采用数字化管理系统。

5.7 增减材加工

5.7.1 增减材交替

5.7.1.1 交替时机规划

根据零件特征，提前确定增减材交替时机。增减材交替时机由沉积高度或层数设定，通常沉积20～25层后进行一次减材加工，具体间隔可根据零件几何特征、材料工艺稳定性、刀具尺寸等进行调整。

5.7.1.2 激光电弧增材

激光电弧增材制造过程应符合GB/T 39253-2020中6.6的规定，并满足以下要求：

- 可根据制造零件特征对基材进行预热。
- 进行激光电弧增材时可使用摆动工艺完成不同厚度薄壁的加工。

5.7.1.3 退应力处理

增材制造至增减材交替规划高度后，进行减材前的热处理，降低零件内部热应力。

5.7.1.4 减材加工

可根据零件特征采用粗加工和小切深的精加工方式，冷却方式宜采用干冷或气冷。

5.7.1.5 预留成形面

零件退应力处理后冷却至室温再进行减材加工，减材加工应按照当前零件高度在顶端预留10～20 mm不加工，下一次增材完成后进行减材加工时对上一次预留成形面进行加工。

5.7.1.6 交替过程预热

减材加工完成后，将零件再次预热后进行增材加工，预热温度可根据使用材料确定，一般为80～120 ℃。

5.7.2 形面在线测量

加工工程中可通过设备配备的接触式或非接触式测头进行形面在线测量。

5.7.3 在线检验

制造过程中对零件进行过程检验，包括但不限于外观缺陷、外形尺寸等检验。宜每间隔一定层数或关键特征加工完成后，进行形面测量与尺寸校验。

在线检验不符合要求时，可通过修补、变形校正、机械加工等方式来补救。

表面粗糙度、成形尺寸精度等检验合格后，进入下一步工序。

5.8 清理

成形完成后，将零件在保护气氛或真空环境下冷却到环境温度或特定温度再行清理。清理宜采用防静电毛刷、防爆吸尘器、高压气等进行清理，清理过程中不应损坏零件。

5.9 后处理

5.9.1 零件移除

从基材上移除零件时不应破坏零件且不能影响零件性能，宜采用电火花切割、机械加工、手工去除等方式。

5.9.2 表面处理

增减材成形完成后零件表面处理宜采用喷砂、精磨、抛光、电化学腐蚀、机械加工等方式，是否需要处理可由供需双方协商确定。

5.9.3 热处理

热处理应符合GB/T 39247的规定，热处理时应准备随炉试样，试样应与零件同炉热处理。

5.10 质量检验

应符合GB/T 39253-2020第7章的规定。

参 考 文 献

- [1] GB/T 29070 无损检测工业计算机层析成像(CT)检测通用要求
 - [2] GB/T 35021 增材制造 工艺分类及原材料
 - [3] GB/T 39329 增材制造 测试方法 标准测试件精度检验
 - [4] GB/T 39331 增材制造 数据处理通则
 - [5] GB/T 41507 增材制造 术语 坐标系和测试方法
 - [6] GB/T 42621 增材制造 定向能量沉积-铣削复合增材制造工艺规范
 - [7] GB/T 43615 增材制造 定向能量沉积金属成形件超声检测方法
-