

团 体 标 准

T/EI 3501—2025

机械臂融熔颗粒增材建造技术规范

Technical Specification for Robotic Arm-based Fused Particle Additive
Manufacturing

2025-12-02 发布

2025-12-02 实施

广州市从化区青年创新创业协会 发布

前 言

本文件按照 GB/T 1.1-2020 给出的规则起草。

本文件由国家工业设计研究院（生态设计领域）提出并归口。

本文件起草单位：广州职业技术大学、广东三兆信息科技有限公司、广州异构机器人科技有限公司、广东景海苑新材料科技有限公司、盈创建筑工业化襄阳有限公司、国家工业设计研究院(生态设计领域)、生态设计产业学院、广州市从化区湾区设计协同研究院。

本文件主要起草人：陈泽、邸锐、张丹、余德彬、郭艳云、周晨橙、王南平、潘易林、苗增、马超、应放天、应卫强、王秋蕊、姚琤、尧优生。

引 言

机械臂融熔颗粒增材建造技术作为增材制造领域的重要分支，凭借机械臂高灵活性、大作业空间及颗粒原料低成本优势，在建筑、工业结构等领域实现快速成形，推动制造模式向定制化、绿色化转型。当前技术应用中，原材料质量参差不齐、工艺参数缺乏统一标准、质量控制体系不完善等问题，制约了技术规模化推广及产品可靠性提升。为规范该技术应用，保障成形构件质量与作业安全，提升技术应用一致性与稳定性，依据国家相关法律法规及 ISO、GB 等标准，结合行业实践经验，制定本规范。本规范明确技术应用范围、原材料要求、工艺参数、质量检验及安全环保等核心内容，为行业提供统一技术依据。

机械臂融熔颗粒增材建造技术规范

1 范围

本文件规定了机械臂融熔颗粒增材建造技术评价的基本要求、评价原则、技术要求等体系。

本文件旨在促进机械臂融熔颗粒增材建造技术的评价,包括但不限于 PE、PET/PETE、ABS、PVC、木塑颗粒以及复合材料、可重复使用可再生材料等。

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 35351 增材制造 术语

GB/T 37463 - 2019 增材制造 塑料材料粉末床熔融工艺规范

GB/T 1040.1 塑料拉伸性能的测定

GB 15577 粉尘防爆安全规程

GB/T 34525 - 2017 气瓶搬运、装卸、储存和使用安全规定

3 术语和定义

3.1

机械臂 Robotic arm

又名工业机器人,基于程序控制、多关节协同,可精准完成抓取、搬运、喷涂、加工生产等操作的自动化机械执行机构。可编程、多自由度的自动化机械。

3.2

融熔颗粒技术 Fused Particle Technology

固体物料经加热熔融后,通过成型工艺制成的具有特定形态的颗粒状物质,形成过程是先经高温熔融使固体物料呈液态,再通过冷却、造粒等工艺定型,广泛应用于塑料、化工、建材等领域,作为后续加工的基础原料。

3.3

增材制造 Additive Manufacturing

以数字模型为基础，通过材料逐层累加成型新型制造技术（俗称 3D 打印）。成型原理是摒弃传统减材 / 等材模式，采用“逐层叠加”的方式构建实体。依赖数字模型驱动，需先通过设计软件生成三维数据，可实现复杂结构直接制造，材料利用率高、生产灵活。

3.4

复合颗粒 composite particle

由两种及以上不同成分、性能的物质，经特定工艺复合而成的颗粒状功能材料。兼具各组分优点，可实现单一材料无法达到的综合性能。

4 技术要求

4.1 机械臂熔融颗粒增材建造工作流程

该技术的核心流程是先将电子三维模型导入离线编程软件进行路径规划与参数编辑，再将生成的程序传输至搭载挤出装置的机械臂；机械臂按预设路径运行，将加热至熔融状态的颗粒材料持续挤出并逐层沉积，最终通过材料堆叠形成三维实体。其本质是“颗粒熔融成型”与“机械臂精准控形”的技术融合。

4.2 三维模型及离线编程

4.2.1 通用交互格式

模型需导出为增材制造领域通用的标准格式，以便适配切片软件与机械臂控制系统。其中 STL 格式是基础选择，能完整描述模型的几何轮廓，适配 Cura、Simplify3D 等主流切片软件；若涉及复杂装配或高精度参数传递，可辅以 STEP 或 IGES 格式，保留模型参数化特征，方便后期修改与装配仿真。

4.2.2 软件适配性

编程软件需优先选择 SprutCAM、Robotmaster、RoboDK 等离线编程专用软件。这类软件建模精度高，且能与机械臂运动仿真软件无缝对接，可提前模拟模型成型过程中机械臂的运动轨迹是否会与模型结构发生干涉，避免成型时出现碰撞问题。

4.3 增材制造技术参数

4.3.1 层厚范围与适配场景

成型需求	层厚范围	适配材料类型	适配场景
高精度成型	0.05 - 0.15mm	低粘度高分子（如 PLA、ABS）	精密工装、小型复杂零件、表面质量要求高的构件

通用成型	0.15 - 0.3mm	中粘度高分子、低熔点金属颗粒	常规结构件、设备外壳、中等精度装配件
大尺寸 / 高效成型	0.3 - 1.0mm	高粘度高分子、大型金属结构件	大型工装、建筑构件、艺术装置等对精度要求较低的承重结构

4.3.2 喷嘴温度

按不同的打印材料的不同的熔点，设置不同的喷嘴温度来确保材料能够顺利熔化并流动。避免喷嘴温度过低会导致材料无法充分熔化，或喷嘴温度过高造成材料烧焦或产生气泡。

材料类型	喷嘴温度量化范围	备注
ABS	225 - 235℃	温度过高易出现边缘溢料，建议搭配全封闭打印环境减少温差
PETG	215 - 225℃（普通型）、240 - 260℃（工业级高精打印）	超 230℃易产生表面气泡，高精打印时需精准控温
PC	245 - 255℃	防止温度流失导致层间结合不良

4.3.3 打印速度

设置适当的打印速度，即 3D 打印过程中喷嘴在 XY 平面上移动的速度，确保打印效率和打印质量。在选择打印速度时需要根据打印材料、打印对象的复杂度以及打印质量的要求进行综合考虑。

打印部位	速度量化范围	适用场景
外壁 / 表层	30 - 40mm/s	适用于构件边缘、细小纹路等关键精度部位，可避免材料拉伸变形，保障边缘清晰
内部填充 / 支撑	60mm/s	内部结构对精度要求较低，该速度可平衡打印效率与结构强度
复杂高精结构（薄壁、微细节件）	≤40mm/s	如航天领域小尺寸功能件、精细齿轮等，低速可减少惯性对微小结构的冲击
工业级量产高精件	最高 500mm/s	仅适配复志科技 E3 工业版等高端设备，依靠 CoreXY 结构和 LiDAR 校准技术维持 ±0.02mm 精度，适配批量生产的辅助件

4.3.4 冷却风扇

在一些需要高精构件的打印过程中，由于打印材料的熔化温度较高，需要通过冷却风扇来迅速冷却打印材料，以防止其流动性过强而影响打印精度。

参数类型	量化范围	细节说明
转速	6000 - 12000RPM	主流高精打印适配的涡轮风扇转速，如 4510 系列风扇可达 12000RPM，4020 型号风扇约 6000RPM
供电与电流	12V (0.25A)、24V (0.15A)	12V 风扇如 BFB04512HHA 适配主流主板，24V 风扇如 4020 型号功耗更低，可根据打印机电源匹配
调速方式	PWM 调速	可根据喷嘴温度自动调节转速，如打印初始层时低速运行保障粘合，打印表层时高速冷却；满速运行时噪音控制在 28dB 以下，不影响作业环境

5 评价原则

5.1 机械臂熔融颗粒增材建造使用范围

机械臂熔融颗粒增材建造以大尺寸、低成本、复杂结构件快速制造为核心，适配塑料颗粒、金属颗粒等低成本原料，突破传统增材设备成型空间局限，可实现数米级超大件一体化生产。其覆盖工程机械、模具修复、建筑建造、艺术设计、家居产品等多领域，兼顾生产效率、结构强度与设计灵活性，适配中等精度需求的批量制造或定制化场景。

5.2 适用于机械臂增材制造要求

能满足增材制造工作逻辑的熔融颗粒，核心要求是优异流动性、稳定性能与成型兼容性，需精准适配机械臂熔融沉积的工艺特性，确保送料顺畅、熔融挤出可控，成型时与路径规划、温度参数匹配，保障结构件精度与力学性能达标。

5.2.1 粒径与形貌

颗粒粒径均匀性是熔融颗粒进料顺畅的关键，需控制在 100–500 μm 区间且粒径分布窄，同时呈球形或类球形以减少流动阻力，避免不规则颗粒在机械臂送料通道中卡滞、团聚，保障连续稳定挤出成型。

5.2.2 熔融流动性

热稳定性是熔融颗粒适配增材制造的关键指标，要求加热至熔融温度时无明显分解、不产生有害气体，且含水率需严格控制在 0.1% 以下，以此避免成型过程中因气体残留、水分汽化形成气孔，或因材料降解导致的裂纹缺陷，保障成型件致密性与结构强度。

5.2.3 稳定性指标

热稳定性是熔融颗粒适配增材制造的关键指标，要求加热至熔融温度时无明显分解、不产生有害气体，且含水率需严格控制在 0.1% 以下，以此避免成型过程中因气体残留、水分汽化形成气孔，或因材料降解导致的裂纹缺陷，保障成型件致密性与结构强度。

5.3 材料环保原则与要求

熔融颗粒材料的环保核心原则是低污染、可循环、低碳排放，需贯穿生产、使用、回收全生命周期，要求生产无有害释放、原料优先再生、使用无毒无害，回收可重熔再利用，降低环境负荷。

6 评价指标

6.1 工艺性能评价指标

工艺性能指标聚焦机械臂熔融颗粒增材建造的核心流程与技术参数，直接反映成型精度、效率及稳定性，是评价技术应用效果的核心维度。

6.1.1 三维模型与编程适配性

指标名称	评价内容	检测方法	判定标准
------	------	------	------

模型格式兼容性	模型导出格式是否符合增材制造通用标准，能否适配切片软件与机械臂控制系统	1. 核查模型导出格式文件；2. 分别导入 Cura、Simplify3D 等主流切片软件及机械臂控制系统，验证导入成功率与模型完整性	基础格式为 STL 且导入成功率 100%；复杂场景辅以 STEP/IGES 格式，参数化特征保留完整，判定为合格。
编程软件适配性	编程软件建模精度及与运动仿真软件的对接能力，干涉检测有效性	1. 采用 SprutCAM 等指定软件建模，测量建模误差；2. 进行成型过程运动仿真，模拟机械臂轨迹并检测干涉情况	建模精度 $\leq 0.02\text{mm}$ ；运动仿真无轨迹干涉，干涉检测准确率 100%，判定为合格。

6.1.2 成型参数合理性

指标名称	评价内容	检测方法	判定标准
层厚控制精度	实际成型层厚与预设层厚的偏差，不同成型场景下的适配性	1. 根据成型需求选择对应层厚范围（高精度 0.05–0.15mm 等）；2. 采用激光测厚仪测量成型件不同位置层厚，计算偏差值	高精度成型偏差 $\leq \pm 0.01\text{mm}$ ；通用成型偏差 $\leq \pm 0.02\text{mm}$ ；大尺寸成型偏差 $\leq \pm 0.05\text{mm}$ ，判定为合格
喷嘴温度稳定性	喷嘴实际温度与设定温度的一致性，不同材料打印时的温度适配性	1. 针对 ABS、PETG、PC 等材料分别设定对应温度；2. 采用热电偶实时监测喷嘴温度，记录温度波动范围	温度波动范围 $\leq \pm 2^\circ\text{C}$ ，无材料未熔或烧焦现象，判定为合格
打印速度适配性	不同打印部位的实际速度与设定速度的匹配度，速度对成型质量的影响	1. 分别设定外壁、内部填充、复杂高精结构等部位的打印速度；2. 采用运动轨迹分析仪测量实际速度，观察成型件表面质量与结构强度	实际速度与设定速度偏差 $\leq \pm 5\%$ ；外壁无拉伸变形、复杂结构无破损，判定为合格
冷却风扇有效性	风扇转速、供电稳定性及调速适配性，对成型精度的保障效果	1. 监测风扇转速、供电电压与电流；2. 打印高精构件时，观察不同打印阶段风扇调速效果及成型件精度	转速波动 $\leq \pm 500\text{RPM}$ ；供电稳定符合 12V/0.25A 或 24V/0.15A 要求；PWM 调速响应及时，成型件无流动性偏差，判定为合格

6.1.2 成型参数合理性

指标名称	评价内容	检测方法	判定标准
尺寸精度	成型件实际尺寸与设计尺寸的偏差，关键部位精度达标情况	1. 选取成型件关键尺寸（如长度、孔径等）；2. 采用三坐标测量仪进行测量，计算尺寸偏差	高精度件尺寸偏差 $\leq \pm 0.02\text{mm}$ ；通用件偏差 $\leq \pm 0.05\text{mm}$ ；大尺寸件偏差 $\leq \pm 0.1\text{mm}$ ，判定为合格
结构致密性	成型件内部有无气孔、裂纹等缺陷，材料堆叠的密实程度	1. 采用 X 射线探伤仪检测内部缺陷；2. 截取试样进行截面观察，测量孔隙率	无明显裂纹，孔隙率 $\leq 0.5\%$ ，判定为合格
表面质量	成型件表面粗糙度、边缘清晰度，有无溢料、变形等现象	1. 采用表面粗糙度仪测量表面 Ra 值；2. 目测观察边缘及表面缺陷	高精度件 $Ra \leq 1.6 \mu\text{m}$ ，通用件 $Ra \leq 3.2 \mu\text{m}$ ；边缘清晰无溢料，无明

指标名称	评价内容	检测方法	判定标准
			显变形，判定为合格
力学性能	成型件的抗拉强度、抗压强度等关键力学指标，满足使用需求情况	1. 按照 GB/T 1040 等标准制作试样； 2. 采用万能材料试验机进行力学性能测试	抗拉强度 \geq 材料标准值的 90%，抗压强度 \geq 材料标准值的 90%，判定为合格

6.2 工艺性能评价指标

材料性能指标针对熔融颗粒的核心质量要求设定，直接影响增材建造的顺畅性与成型件质量，是保障技术应用的基础维度。

6.2.1 粒径与形貌指标

指标名称	评价内容	检测方法	判定标准
粒径范围与均匀性	颗粒粒径是否在指定区间，粒径分布的集中程度	1. 采用激光粒度分析仪测量颗粒粒径；2. 统计粒径分布曲线，计算粒径分布跨度	粒径在 100-500 μm 区间；粒径分布跨度 \leq 1.2，判定为合格
颗粒形貌	颗粒是否呈球形或类球形，有无不规则形态导致的流动阻力问题	1. 采用扫描电子显微镜观察颗粒形貌；2. 统计球形度 \geq 0.8 的颗粒占比	球形度 \geq 0.8 的颗粒占比 \geq 90%，无明显棱角或粘连，判定为合格
送料顺畅性	颗粒在机械臂送料通道中的流动情况，有无卡滞、团聚现象	1. 搭建模拟送料系统，通入定量颗粒；2. 记录送料时间，观察通道内颗粒堆积情况	送料速率稳定，无卡滞、团聚，单次送料完成时间偏差 \leq \pm 10%，判定为合格

、6.2.2 熔融与稳定性能指标

指标名称	评价内容	检测方法	判定标准
熔融流动性	颗粒加热熔融后的流动性能，是否满足挤出成型需求	1. 采用熔体流动速率测定仪，在对应材料熔融温度下测量熔体流动速率（MFR）；2. 观察熔融状态下材料的均匀性	MFR 符合对应材料成型要求，熔融后无明显杂质或结块，判定为合格
热稳定性	颗粒在熔融温度下的分解情况，有无有害气体产生	1. 采用热重分析仪进行热稳定性测试；2. 采用气体检测仪器检测熔融过程中气体成分	熔融温度下质量损失率 \leq 1%；无有害气体（如甲醛、苯系物）释放，判定为合格
含水率	颗粒中的水分含量，是否会导致成型缺陷	采用卡尔费休水分测定仪测量颗粒含水率，平行测量 3 次取平均值	含水率 \leq 0.1%，判定为合格
成型兼容性	颗粒与工艺参数的匹配度，能否保障成型质量稳定	采用标准工艺参数打印试样，连续打印 5 批次，检测每批次试样的质量一	5 批次试样尺寸偏差波动 \leq \pm 0.03mm，无批次性缺陷，判定为合格

指标名称	评价内容	检测方法	判定标准
		致性	

6.3 环保性能评价指标

环保性能指标遵循低污染、可循环、低碳排放的核心原则，覆盖材料全生命周期，是技术可持续应用的重要保障维度。

指标名称	评价内容	检测方法	判定标准
生产过程环保性	颗粒生产过程中有无有害释放，能耗水平	1. 核查生产企业环保检测报告，确认废气、废水排放情况；2. 统计单位质量颗粒生产能耗	废气、废水排放符合 GB 16297 等国家标准；单位能耗 \leq 行业平均水平的 90%，判定为合格
原料环保性	原料是否优先采用再生材料，有无有毒有害成分	1. 核查原料成分报告，确认再生材料占比；2. 按照 GB 6675 等标准检测有毒有害元素含量	再生材料占比 \geq 30%（无再生条件除外）；有毒有害元素含量符合对应材料安全标准，判定为合格
使用过程环保性	打印过程中有无有毒有害气体或粉尘产生，噪音污染情况	1. 检测打印现场气体成分与粉尘浓度；2. 采用噪音计测量作业环境噪音	有毒有害气体及粉尘浓度符合 GBZ 2.1 标准；噪音 \leq 28dB，判定为合格
可回收利用性	成型件废弃后能否重熔再利用，回收后性能保留情况	1. 将废弃成型件破碎重熔制成颗粒；2. 测试回收颗粒的熔融流动性与力学性能，与原颗粒对比	可重复回收利用 \geq 3 次；回收后颗粒性能保留率 \geq 85%，判定为合格
低碳排放性	材料全生命周期（生产、打印、回收）的碳排放水平	采用生命周期评价（LCA）方法，计算单位质量材料全生命周期碳排放量	碳排放量 \leq 同类型传统材料的 80%，判定为合格

6.4 评价指标权重与判定规则

6.4.1 指标权重分配

为突出核心评价重点，采用层次分析法确定各维度权重，总权重为 100%：工艺性能：50%（其中三维模型与编程适配性 10%、成型参数合理性 20%、成型质量达标性 20%）材料性能：35%（其中粒径与形貌指标 10%、熔融与稳定性能指标 25%）环保性能：15%（各指标平均分配权重）

6.4.2 综合判定规则

等级判定：综合得分 \geq 85 分为“优秀”；70 分 \leq 综合得分 $<$ 85 分为“合格”；综合得分 $<$ 70 分为“不合格”。

