

增材制造 设计 功能梯度增材制造

1 范围

本文件描述了功能梯度增材制造的概念，介绍了技术现状、局限性和潜在应用领域。

本文件对数据交换格式和一些最新应用进行了评估，并就克服障碍的可能策略和FGAM的未来发展方向提出了建议。

2 规范性引用文件

GB/T XXXX 增材制造 功能梯度增材制造工艺规范

3 术语和定义

本文件没有需要界定的术语和定义。

4 符号和缩略语

下列缩略语适用于本文件。

AM: 增材制造 (Additive Manufacturing)，见GB/T 35351

AMF: 一种增材制造文件格式 (Additive Manufacturing Format)，见8.4.2.1(见GB/T 35351)

CAD: 计算机辅助设计^[48] (Computer Aided Design)

CAE: 计算机辅助工程^[14] (Computer Aided Engineering)

DED: 定向能量沉积 (Directed Energy Deposition)，见第六章 (见GB/T 35351)

DMLS: 直接金属激光烧结 (Direct Metal Laser Sintering)，由EOS GmbH公司命名的基于激光的金属粉末床熔融工艺^[40]

EBM: 电子束熔化成形 (Electron Beam Melting)，由Arcam AB公司命名的基于电子束的金属粉末床熔融工艺^[40]

FAV: 可制造体素^[19] (Fabricatable Voxel)，见8.4.2.2

FEA: 有限元分析^[48] (Finite Element Analysis)

FEF: 冷冻成形挤出制造^[34] (Freeze-form Extrusion Fabrication)，一种材料挤出工艺，其基于糊状原料的挤出，并应用冷冻干燥形成坯体，可以通过烧结将其固化实现所需的材料性能。目前仅用于研发项目

FEM: 有限元法 (Finite Element Method) ^[18]

FDM: 熔融沉积成形，由Stratasys Ltd命名的一种材料挤出工艺^[39]

FGAM: 功能梯度增材制造^[61] (Functionally Graded Additive Manufacturing)

FGMs: 功能梯度材料^[61] (Functionally Graded Materials)

FGRP: 功能梯度快速原型 (Functionally Graded Rapid Prototyping)，是Neri Oxman在一些出版物中使用的FGAM的名称^[56]

LCC: 局部成分控制 (Local Composition Control)

LMD: 激光金属沉积 (Laser Metal Deposition), 定向能量沉积工艺的历史名称, 该过程使用激光作为能量源, 在沉积金属材料时熔化和熔融金属材料, 见第6章^[21]

LOM: 分层实体制造 (Laminated Object Manufacturing), 薄材叠层工艺的历史名称, 最初由Helisys Inc开发的薄板层压工艺的名称^[42]

MEX: 材料挤出^[39] (Material Extrusion), 见GB/T 35351

MMAM: 多材料增材制造 (Multi-Material Additive Manufacturing), 在同一过程中使用多种材料时用于AM的名称^[61]

MM FGAM: 多材料功能梯度增材制造 (Multi-Material Functionally Graded Additive Manufacturing), 当功能梯度基于在同一过程中使用多种材料的建筑零件, 并且不同材料成分的构成由计算机程序控制时, FGAM的名称^[43]

PBF: 粉末床熔融 (Powder Bed Fusion), 见GB/T 35351

DED-LB/M: 金属激光定向能量沉积^[40] (Laser-based Directed Energy Deposition of Metals)

PBF-EB/M: 金属电子束粉末床熔融^[40] (Electron Beam-based Powder Bed Fusion of Metals)

SHL: 薄材叠层 (Sheet Lamination), 见GB/T 35351

SHS: 选区热熔烧结 (Selective Heat Sintering) 是一种粉末床熔融工艺的名称, 该工艺通过热打印头而不是更常见的激光熔合聚合物粉末。该工艺最初由Blueprinter开发, 但在该公司破产后已退出市场^[40]

SLM: 选区激光熔融 (Selective Laser Melting), GB/T 35351, 基于激光的金属粉末床熔融工艺的名称, 最初由Realizer GmbH和Fraunhofer激光技术研究所合作开发。该名称目前是SLM Solutions Group AG的注册商标, 但也被其他几家公司根据许可协议使用^[40]

SLS: 选区激光烧结 (Selective Laser Sintering), GB/T 35351, 基于激光的聚合物粉末床熔融工艺的名称, 最初由DTM公司开发, 但已由该公司收购的3D Systems公司承担。由于这是第一个商业化的粉末床熔融工艺, 因此有时它被用作所有粉末床熔融工艺的同义词^[40]

STL: 标准三角测量语言 (Standard Triangulation Language), 三维实体模型的数字文件格式的名称, 最初是由3D Systems为立体光固化工艺开发的, 因此得名。由于这种格式的转换在一些CAD程序中普遍可用, 因此该文件格式直到目前一直有效地作为AM工艺的事实标准 (见GB/T 35351)

UAM: 超声波增材制造 (Ultrasonic Additive Manufacturing), 由Fabrisonic LLC公司命名的金属板层压工艺。该工艺通过超声波振动熔融金属薄板 (或薄带)^[43]

VDM: 模糊离散建模 (Vague Discrete Modelling)^[8]

VPRP: 可变性能快速原形 (Variable Property Rapid Prototyping), NeriOxman在一些出版物中使用的FGAM的名称^[52]

3MF: 3D制造格式 (3D Manufacturing Format), 在增材制造中一种三维固体模型的数字文件格式, 由3MF联盟开发, 见 8.4.2.3^[3]

5 功能梯度增材制造 (FGAM) 的概念

5.1 概述

与减材制造和等材制造方法不同, 增材制造 (AM) 是以三维模型为基础, 通过材料堆积的方式制造零件或者实物的工艺, 通常是逐层进行的 (见GB/T 35351)。AM通过将材料作为单个单元准确放置在设计域内的设定位置, 实现了精细定制零件或实物的直接制造。AM的应用为使用功能梯度材料 (FGMs) 制

造零件提供了可能性,即功能梯度增材制造(FGAM)。适用于功能梯度材料制造的AM技术包括材料挤出、定向能量沉积、粉末床熔融、立体光固化、薄材叠层和材料喷射等。

功能梯度增材制造(FGAM)是一种通过改变制件的微观要素(包括材料组分和/或结构),在特定方向上呈连续(或非连续)的梯度变化,实现其性能和功能呈连续(或非连续)梯度变化的一种增材制造工艺。

FGAM有助于实现更高效的工程结构,其目的是通过材料梯度变化制造性能可控的任意零件。与主要关注以形状为核心的传统单材料和多材料AM不同,FGAM是一种以材料为核心的制造过程,意味着从轮廓建模到性能建模的转变。将性能驱动的理念引入到材料设计中是AM技术的突出优势并实现了AM技术的重大进步。例如,使用传统方法难以实现功能集成的可定制化内部特征的制造,而FGAM可以通过精确控制材料基体中增强相的数量、体积、形状和位置,来获得面向特定应用的所需机械性能^[18]。

参考文献[57]将FGAM的概念描述为一种可变性能快速原型(VPRP)方法,在同一设备中能够在复杂的3D分布中策略性地控制材料的密度和方向性,以制造具有高度无缝集成的整体结构。通过在预定位置改变材料成分、相或微观结构来改变材料特性和性能。FGAM可实现的潜在材料组分可分为3类:

- a) 成分梯度变化功能梯度;
- b) 结构梯度变化功能梯度;
- c) 同时具有材料成分梯度变化和结构梯度变化的复合梯度。

这3种类型的特性见5.2和5.3。

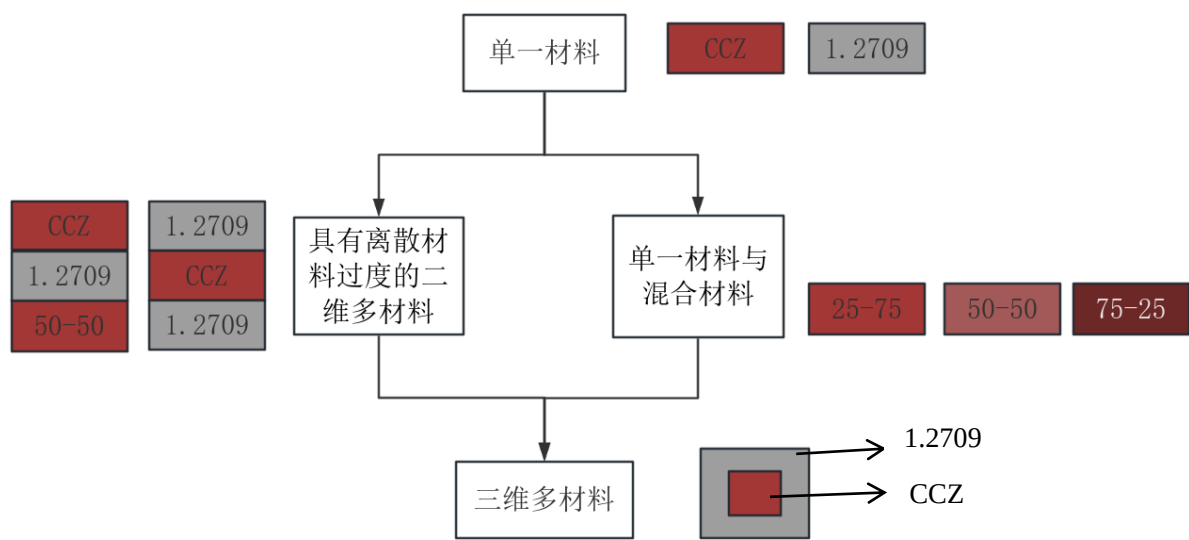
5.2 均质组分-单材料 FGAM

FGAM可以通过策略性地调节整个实体材料体积中点阵结构的空間位置(例如密度和孔隙度)和形态来高效制造工程结构^[43],称为变密度FGAM(也称为孔隙梯度FGAM)。参考文献[56]提出了一种仿生增材制造方法,例如自然界中棕榈树的径向密度梯度、海绵状骨小梁结构以及具有弹性和刚度不均匀变化的肌肉组织。参考文献[54]中提到单一各向异性复合结构中材料物质的方向性、大小和密度有助于获得功能差异性以调控物理特性,并通过多层次结构构建功能化形状。

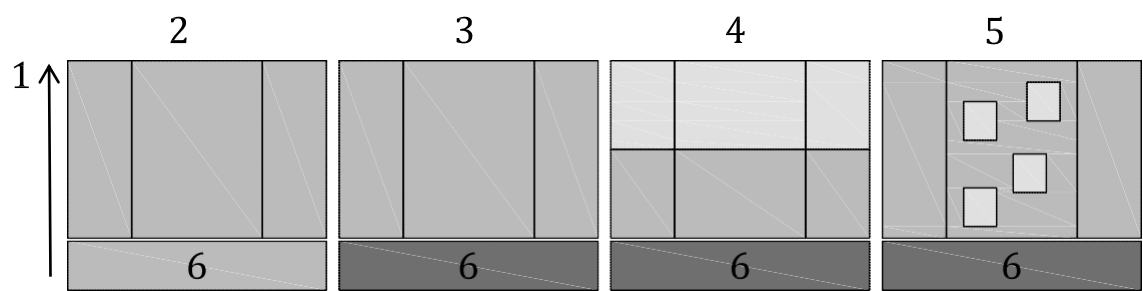
人造结构(如混凝土柱)是典型的体积均质结构^[27]。史蒂文·基廷(Steven Keating)通过改进材料挤出头的MakerBot设备制造出功能梯度混凝土,实现了变密度单一材料FGAM。混凝土块表现出密度的功能梯度以模拟棕榈树从实体外部到多孔核心的蜂窝状结构。孔隙梯度是通过在制造过程中改变分配在不同位置的粉末粒度或通过改变制造工艺参数来实现的^[43]。参考文献^[27]中,密度是通过在给定位置调节混凝土的水占比来控制的,从而获得优异的比强度,使其比实心混凝土更轻但更坚固。

5.3 异质组分-多材料 FGAM

多材料增材制造(MMAM)可以使用具有多个喷嘴的传统3D打印机实现,从而将不同的材料输送到成形平台^[77]。在粉末床熔融中,MMAM通过利用传统的铺粉装置结合在固化^[7]后去除粉末的抽吸模块来实现。由于大多数传统MMAM复合材料中存在突变的组元界面,两者相互作用导致产生脆性相^[72]。失效通常源于材料特性突变界面处,例如由两种材料之间的表面张力引起的分层或裂纹^[17]。多材料FGAM可以通过去除不同或不相容材料之间的明显边界来改善界面结合,将大幅降低机械应力集中和不同膨胀系数引起的热应力^[72]。参考文献^[7]中的多材料增材制造的体素化方法示意图2 a)和b)。



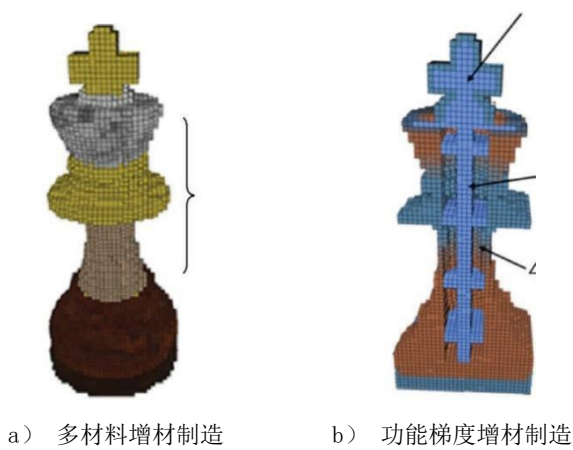
a) 以3D形式排列体素的概念图(弗劳恩霍夫IGCV和参考文献^[7])



b) MMAM图解(Fraunhofer IGCV和参考文献^[7])

- 标引序号说明：
- 1——成形方向；
 - 2——单一材料；
 - 3——2D混合；
 - 4——2D多材料；
 - 5——3D多材料；
 - 6——基体。

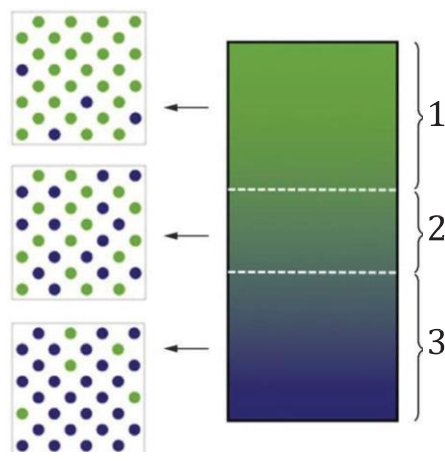
图 2 多材料增材制造的体素化



标引序号说明：
1——材料性能的离散变化；
2——增强用硬质材料；
3——增强支柱形状；
4——材料改变的平滑过渡。

图 3 具有多种材料的零件示例^[73]

参考文献^[10]论述了材料通过夹层结构的耦合效应实现零件性能的最佳组合，例如重量、表面硬度、耐磨性、抗冲击性或韧性；或者通过产生材料梯度改变复杂形状的物理、化学、生物化学或机械性能^{[22][28]}。由于两相的几何排列影响整体材料性能，因此适当控制AM工艺精度，以确保最终零件满足预期功能要求^[72]。参考文献^[73]论述了多材料AM和功能梯度AM零件之间的差异，见图3。图4进一步展示了使用2种材料的FGAM的连续梯度微观结构。



标引序号说明：
1——相1（以相2为基体的颗粒）；
2——过渡相；
3——相2（以相1为基体的颗粒）。

图 4 FGAM 连续梯度微观结构——两种材料

通过控制在材料沉积和固化之前混合的两种或两种以上材料的比例，可以在3D空间内产生连续变化^[43]。根据参考文献^[75]，由计算机程序控制材料组分变化被视为FGAM，沉积或固化前预混合或合成的原

材料不被视为FGAM。FGAM多层复合材料可分为4种类型：2种材料之间的过渡[图5 b]、3种及以上材料之间的过渡[图5 c]、不同位置之间的成分切换[图5 d]和变密度的异质成分之间的过渡[图5 e]。

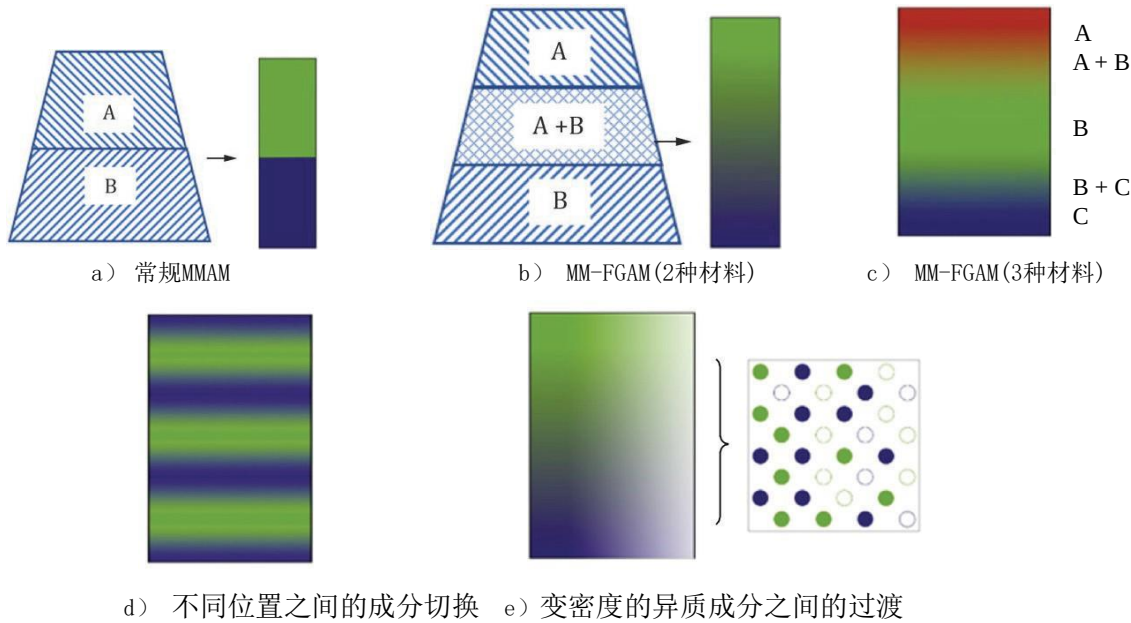
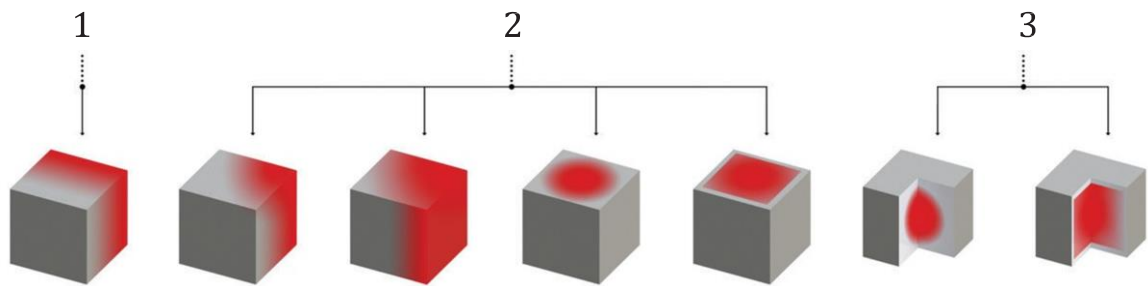


图 5 各类多材料排布方式

异质构件内的材料变化可分为1D、2D和3D梯度^[48]。关键参数包括梯度向量的维数、几何形状和等位面的重新划分。不同FGAM梯度分类见图6。



标引序号说明：
1——一维梯度；
2——二维梯度；
3——三维梯度。

图 6 FGAM 梯度分类示意图

6 功能梯度增材制造的进展

6.1 概述

AM具有设计自由度高、产品开发及服务上市时间短，以及研发效率高等优势^[5]。FGAM的出现使得高效的工程结构原型制造更具潜力，在无需制作模具的前提下即可获得更好的功能性和结构性^[61]。

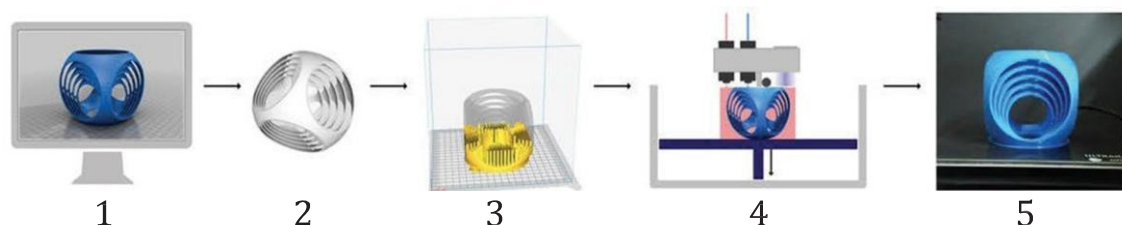
FGAM在工业机械、装配过程和供应链方面提出了一种新的制造模式^[20]，为设计、性能、成本和生命周期管理等方面提供了广泛的机遇。例如，FGAM可以通过调整点阵结构来实现轻量化设计，在保持结构强度的条件下实现重量减轻。此外，通过定制材料基体、体积、增强相及其形状和位置以及制造方法，可以实现特定应用所需的特殊预期性能^[18]。通过材料替代，可以实现突破性创新，特别是在医疗植入物行业、航空航天和创意产业^[50]。

FGAM在多材料增材制造过程中通过优化材料开发利用和拓展设计模式^{[5][63]}，提高了材料加工能力，有助于材料的高效利用^[57]。其通过动态梯度变化简化了复杂零件的装配，避免了传统复合材料所带来的劣势，如降低关键部位的面内应力和横向应力，改善残余应力分布，增强抗断裂性、热性能和断裂韧性，并降低应力集中^{[10][13]}。FGAM还可以在零件周围特定部位或关键部位提供所需特性^[75]。尽管通过AM制备零件的时间相较于传统制造而言更长，但其具有整合多个加工过程变为一体化制造的能力，大大缩短了产品制造及上市的时间。由于FGAM组件在制造过程中可设计为自支撑结构，无需过多支撑结构，因此减少了支撑材料的使用。FGMs还提供性能可变的支撑，即可将牺牲区设计为可移除结构。FGAM具有满足未来环境可持续性要求的潜力，例如减少材料使用和能源消耗。

6.2 AM和FGAM工艺

关于增材制造中的关键过程包括5个主要阶段（见图7）：

- 1) 将CAD文件导入AM系统；
- 2) 将CAD文件转换为STL（或AMF）文件；
- 3) 将三维CAD文件切片为2D代码；
- 4) AM零件的逐层制造
- 5) 后处理或最终零件精加工（例如去除支撑结构、清洁和抛光）。



标引序号说明：

- 1——基于CAD的三维模型；
- 2——STL文件；
- 3——切片层；
- 4——AM制造；
- 5——最终零件精加工。

图7 增材制造（AM）工艺流程

FGAM方法突出了路径规划的重要性。打印路径的规划是影响所制备零件材料分布的关键因素。参考文献[48]和[47]中将路径规划特征描述为4个步骤，见表1。

表1 路径规划特征

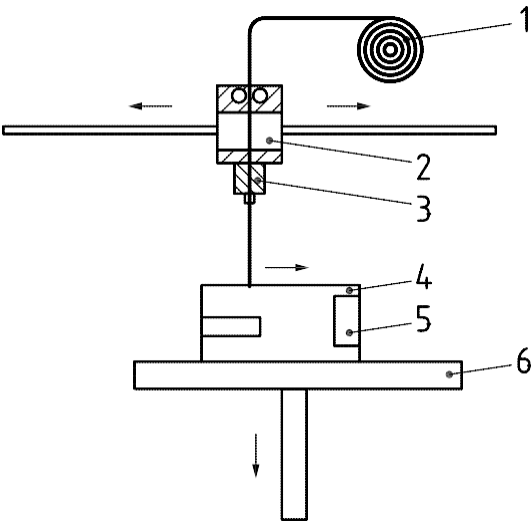
第1步： 零件几何形状和材料的描述	通过对零件的几何形状、材料分布、梯度维度或向量、等成分或等性能表面形状的描述来定义零件的机械功能
----------------------	--

第 2 步： 确定制造策略	收集所用材料的化学成分和特性有关的数据。定义切片材料的分布和方向。 对扫描轨迹进行评估和计算，使用得到的数据确定最合适的制造策略和打印设备。
第 3 步： 数控编程	例如，生成相关路径和工艺参数的数控（NC）编程；但不限于扫描路径中的 G 代码（ISO 6983）。根据所定义的路径生成包含设备数据和材料分布的三维网格。
第 4 步： 制造	使用数控（NC）程序（比如：使用 CNC 控制器）进行制造。发送文件到增材制造（AM）设备从而开始制造。该过程使用预先确定的特定材料逐层堆积成形零件或实物。

功能梯度主要AM工艺包括材料挤出、粉末床熔融、定向能量沉积、薄材叠层和立体光固化（见 6.3-6.7）。用于制造金属-金属或金属-陶瓷功能梯度材料的技术主要包括选择性激光熔化、基于激光熔覆技术和超声波固结（UC）。在制造聚合物-聚合物或聚合物-陶瓷、陶瓷-陶瓷功能梯度材料时，主要使用选择性激光烧结和喷墨打印（材料喷射）^{[15][16][17]}。

6.3 材料挤出

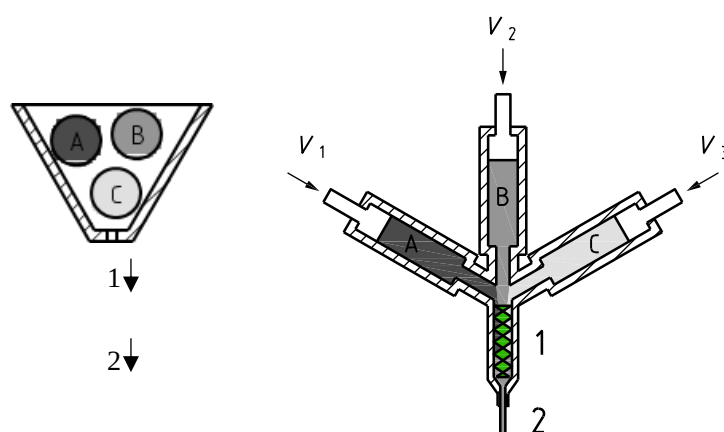
材料挤出是一种通过喷嘴或孔口选择性地沉积材料的增材制造工艺(ISO/ASTM 52900)(见图 8)。在这种工艺中，ABS、PLA、尼龙等聚合物在挤出头中加热并通过喷嘴挤出，逐层沉积形成零件或实物。材料挤出中的关键工艺参数是沉积宽度、光栅填充角度和光栅填充模式^[43]。当使用该工艺成形公差要求较高的零件时，需要考虑重力和表面张力^[21]。



- 标引序号说明：
- 1——供料装置；
 - 2——加热元件；
 - 3——喷嘴；
 - 4——实物或零件；
 - 5——支撑材料；
 - 6——成形平台。

图 8 材料挤出^[39]

冷冻成形挤出制造 (FEF) 是另一种通过计算机控制挤出和沉积来逐层成形 FGAM 零件的工艺。如图 9 所示, 它可以采用三重挤出装置, 每个挤出机携带一种材料浆料^[45], 将不同材料的浆料送入静态混合器混合成均质浆料(被称为生坯)。文献[34]研究了氧化铝(Al_2O_3)和氧化锆(ZrO_2)组成的生坯在 -25°C 的低温和3000Pa的压强下冷冻干燥24h, 然后在第一次加热时, 以 $1^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速率加热至 600°C 进行高温烧结, 烧掉有机粘结剂, 之后第二次加热, 以 $10^\circ\text{C}/\text{min}$ 的升温速率加热至 1550°C , 保温90min, 并以 $25^\circ\text{C}/\text{min}$ 的冷却速率冷却至室温。该过程中的加热温度通常不超过材料的熔点^[34]。随后采用能量色散谱仪(EDS)分析烧结的FGM构件的材料成分, 分析发现使用FEF工艺的梯度样品显示出良好的成分梯度变化。



标引序号说明:

1——静态混合器;

2——生坯。

图 9 静态混合器和三重挤出设备示意图

通过规划(考虑时间延迟)和控制不同浆料的相对流速, 可以实现零件制造过程中对材料成分及梯度的连续控制。例如, 假设含有 3 种不同浆料的 3 个圆柱腔室具有相同的横截面积, 通过控制 3 个腔室的柱塞速度, 如 $v_1: v_2: v_3 = 2: 3: 5$, 可以得到由 20 % 浆料 A、30 % 浆料 B 和 50 % 浆料 C 组成的均匀混合浆料, 其中 v_1 、 v_2 和 v_3 分别为浆料 A、B 和 C 的柱塞速度。

由于材料易于获得, 具有广泛使用和低成本的

材料挤出是一种广泛使用且成本较低的工艺, 且可以利用 ABS 等现有材料, 能够实现零件良好结构性能的近净成形。~~材料挤出是一种广泛使用且成本较低的工艺, 其能够实现零件良好的结构性能, 且材料易于获得(如 ABS 等)。~~与其他增材技术相比, 材料挤出的精度和速度较低, 受喷嘴半径和成形层厚影响, 导致零件成形质量较低^[32]。为了提高表面质量, 需考虑多种因素(如材料的恒定压力)。对于大多数与热相关的后处理工艺会产生收缩, 如果公差要求较高需考虑收缩问题。

目前, 材料混合和挤出过程的控制需要拆分为两个独立的系统, 然后与喷嘴运动路径协调, 从而形成所设计的梯度。参考文献[54]指出, 主轴输出通道直接与挤出系统控制器通信。

材料挤出工艺通过改变沉积密度和沉积取向，能够控制零件的局部性能。图 10a)和 b)给出了两个控制局部性能的例子。二者几何形状相同，四个部分的截面采用不同的成形策略，从而实现性能的局部控制。通过在不同取向上沉积不同密度的丝材，可以局部控制零件的刚度特性^[35]。

研究人员开发了一种工艺架构，使用材料挤出工艺制备 ABS FGM，在零件不同区域实现性能（如材料剪切性能）^[68]变化。这项工作可以扩展到对不同载荷条件下的零件进行建模和模拟。该架构首先是确定可能影响零件性能的工艺参数，基于先前建立模型得到的经验（模型体积是影响材料密度和弹性模量的主要参数之一），确定主要的工艺参数为：光栅宽度、轮廓宽度、间隙和光栅角度。

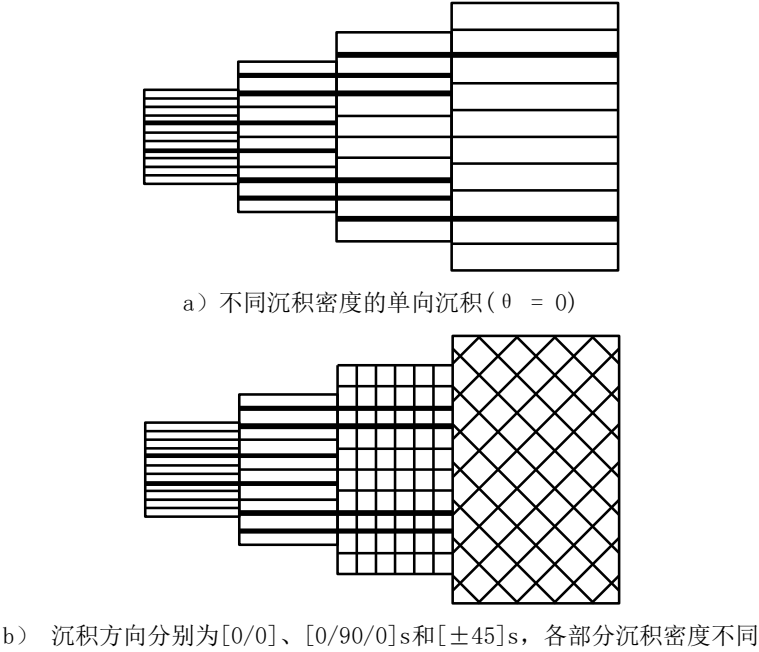
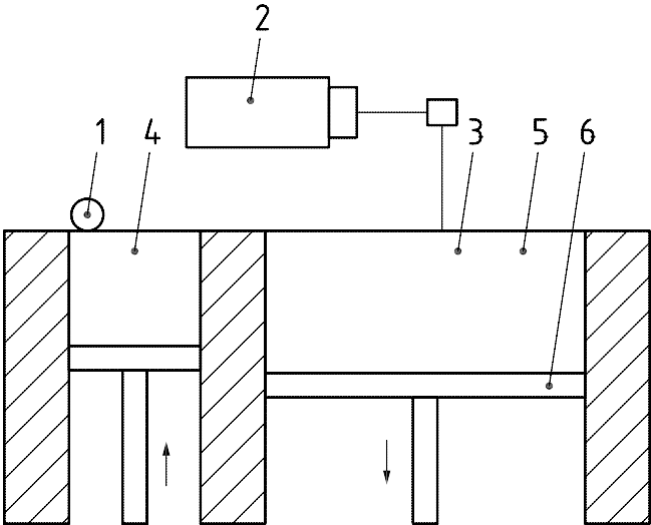


图 10 俯视图显示的沉积方向和密度差异

6.4 粉末床熔融



标引序号说明：

- 1——铺粉辊；
- 2——激光器；
- 3——粉末床内的材料；
- 4——粉仓；
- 5——实物/零件；
- 6——成形平台。

图 11 粉末床熔融^[40]

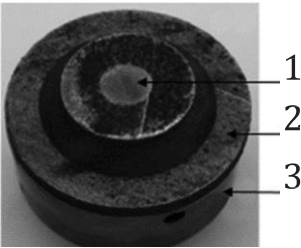
粉末床熔融方法（PBF）包括直接金属激光烧结（DMLS）、电子束熔化（EBM）、选区热烧结（SHS）、选区激光熔融（SLM）和选区激光烧结（SLS）不同技术，上述技术均涉及下述两个过程：采用铺粉装置在工作台上逐层铺设一定厚度（例如0.1mm）的一层粉末材料，并利用激光束或电子束按照截面轮廓的信息对金属粉末进行有选择的熔融结合（见图11）。PBF是一种相对经济的增材制造工艺，材料选择范围比其他工艺更加广泛。用于SHS的常见粉末材料是尼龙；用于DMLS、SLS、SLM的常见粉末材料有不锈钢、钛、铝、钴铬、钢，用于EBM的常见粉末材料有不锈钢、钛、铝、钴铬、钢以及铜^[41]。除了实现具有高分辨率的复杂功能结构外，PBF还在原料流动性、可重用性以及无支撑结构打印方面取得了进步。然而，大多数基于激光的PBF系统的缺点是成形效率低^[23]。制件的表面粗糙度取决于粉末粒度，通常需要进行后处理。

参考文献[16]使用SLS工艺制备了基于功能梯度聚合物纳米复合材料的三维结构体，该纳米复合材料由尼龙11和具有不同体积分数的15 nm气相二氧化硅纳米颗粒（0 %~30 %）组成。该文献通过实验设计（DOE）确定了不同组分的SLS工艺参数，利用光学显微镜和透射电子显微镜（TEM）检测了纳米复合材料的密度和微/纳米结构，然后测试每种组分的拉伸和压缩性能，这些特性随填料体积分数的变化呈现非线性变化。上述结果用于成形呈现一维聚合物纳米复合材料梯度的两组分设计。

结果表明，SLS可以使用合适的粉末输送方式，制备具有空间力学性能变化的复杂零件^[16]。由于SLS技术成形精度高，可以将非常薄的部分（从0.02 mm~0.06 mm）连接在一起，因此可以成形具有非常复杂几何形状的零件。参考文献[69]和[74]的研究结果表明，SLS可以制造与人体骨骼紧密匹配的FGM植入物和支架。参考文献^[74]使用SLS工艺对具有梯度孔隙率的Ti-6Al-4V钛合金植入物性能进行了实验，实验评估性能包括表面粗糙度、微结构、化学成分和机械性能。

选区激光熔融（SLM）是另一种利用金属实现FGAM的潜在技术，在该技术中铺设的金属粉末被高功率激光束熔融成形。如果使用两个送粉器，则可以连续改变金属零件的成分^[31]。SLM的一个独特优势是能够制造包含点阵结构的零件，如参考文献[44]所示，该文献研究了均匀密度Al-Si10-Mg点阵的几何结构和力学性能之间的关系，以及准静态加载下FGM的压碎行为。成形的点阵结构可能发生脆性坍塌并可能表现出变形，通过热处理调控微观组织可显著改善上述性能并提高其能量吸收能力。经热处理的梯度点阵结构显示出渐进层坍塌和渐进强化。梯度结构和均匀结构在致密化之前吸收的能量几乎相同，但与均质结构相比，梯度结构的致密化发生时其应变率降低约7%。

奥格斯堡的Fraunhofer IGC研究院制造了一个能够显示两种材料的连续分配和固化的原型。参考文献[7]证明了在一层中同时成形两种不同材料零件的可能性，如图12所示。这是通过逐点熔融结合材料来实现的，而无需在原位处理之前混合材料。



标引序号说明：

1——1. 2709工具钢；

2——CuCr1Zr；

3——由1. 2767工具钢制成的传统制造零件。

注：1. 2709嵌入CuCr1-ZrO₂圆锥体中，由弗劳恩霍夫IGCV和参考文献^[7]提供。

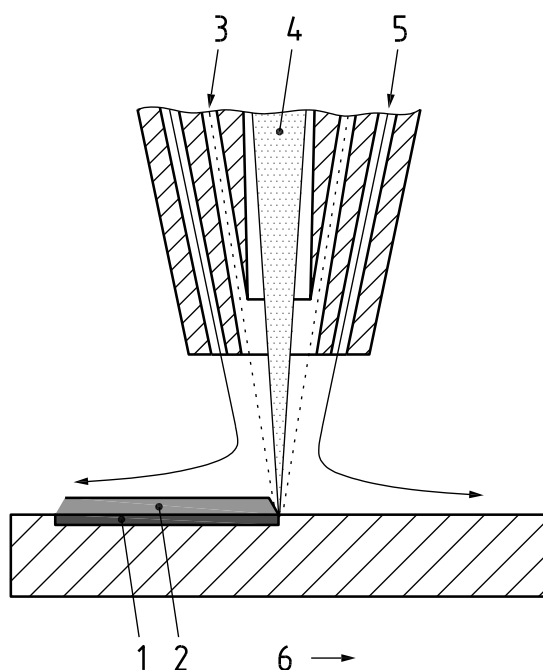
图 12 激光粉末床熔融制造的由铜铬氧化锆和 1. 2709 工具钢组成的多材料零件

EBM工艺也可用于快速、高效地制造具有良好机械性能的FGM零件^[15]。由于成形温度较高，EBM零件具有低残余应力^[15]。参考文献[71]对电子束熔融Ti-6Al-4V钛合金不同层厚下的微观组织进行了实验和模拟研究，并验证了上述结论。

6.5 定向能量沉积

激光金属沉积（LMD）是一种重要的直接金属沉积技术，属于AM的定向能量沉积（DED）。DED是一种更复杂的制造工艺，通常用于产品再制造。它能够在单步工艺过程中基于三维CAD模型对现有材料基本结构进行修改、修复、加固零件或添加其他材料（例如涂层），这是其他AM技术无法实现的^[21]。基于激光的定向能量沉积（DED）增材制造工艺可用于通过调整输送至熔池的金属粉末^[12]或金属丝^[52]，制造具有梯度的金属零件。该结论使用多丝气体保护焊（GMAW）来控制铝合金沉积层成分^[62]已被证实。LMD也可用于制造整个零件；然而，参考文献[6]介绍了LMD在几何复杂性方面仍然有限，需要开发新的方法来改进系统，以处理更复杂的几何零件。

典型的DED设备含有安装在多轴臂上的喷嘴，该喷嘴将熔化的材料（金属丝或粉末）从一个角度沉积到指定的表面上。激光、电子束或等离子弧输出的能量用于在基板上熔化材料并凝固形成多点、多道和多层；粉末或金属丝材料与能量源同步输送至熔池（见图13）。



标引序号说明：

- 1——重熔区；
- 2——沉积层；
- 3——粉末流；
- 4——激光束；
- 5——保护气体；
- 6——沉积方向。

图 13 DED 工艺

LMD可用的材料包含激光能够熔化的材料，例如钢、钛、钴、镍、铝、铜及其合金，但受限于粉末能够在熔池内熔合。因此，在选择材料时，丰富的化学和物理知识非常重要^[6]。尽管LMD工艺是一种全新的制造技术^[12]，但在氩气气氛下，文献[12]使用带有RPM 557激光沉积系统的DED工艺，成功地对304L不锈钢逐步过渡为Inconel 625的FGM零件的制造，并进行了热力学研究。该系统允许在制造过程中向成形零件中添加多达四种粉末，每个沉积层中每种粉末的体积分数可以改变约1 %。在试验中，先沉积了20层SS304L；在过渡区域，SS304L粉末的体积逐层减少4%，IN625粉末在每个连续层中增加相同的量，共24层；在梯度区顶部沉积了19层IN625，这些层的高度约为0.5 mm，由910W YAG激光器以60°的开口角成形^[12]。

6.6 薄材叠层

功能梯度材料零件的薄材叠层可以通过超声波增材制造（UAM）和分层实体制造（LOM）实现（见图14）。UAM使用超声波焊接的铝、铜、不锈钢和钛等金属薄片或薄带，而LOM虽采用类似的逐层方法，但使用纸张和粘合剂代替焊接。根据CAD数据生成的路径，使用激光切割出不需要的区域图案，以便于在加工完成后清除废料^[43]。在焊接过程中，UAM通常需要额外的CNC加工和去除未结合的金属。UAM是一种可制造具有内部几何形状的金属功能梯度零件的低温工艺。

作为一种固态工艺，UAM和LOM不需要熔化材料。UAM可以使用相对较低的超声波频率和压力的能量组合，将材料精确地结合到FGM的金属-金属梯度层上，制造具有预设梯度特性的金属产品^[33]。LOM的主要优点包括速度快、成本低、材料易处理，但模型的强度和整体性取决于使用的粘合剂^[42]。由于切割

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/466035241231010211>