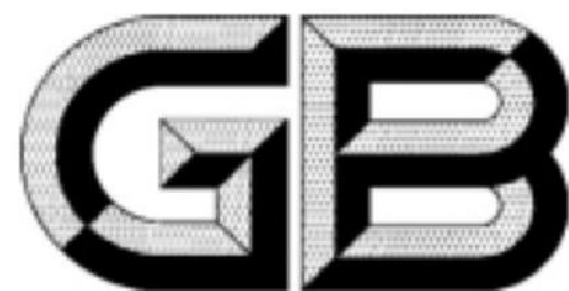


ICS 25.030
CCS J 04



中华人民共和国国家标准

GB/T 42617—2023

增材制造 设计 金属材料激光粉末床熔融

Additive manufacturing—Design—Laser-based powder bed fusion of metals

**(ISO/ASTM 52911-1:2019, Additive manufacturing—Design—
Part 1: Laser-based powder bed fusion of metals, MOD)**

2023-05-23 发布

2023-12-01 实施

国家市场监督管理总局

发布

国家标准化管理委员会

目 次

前言	I
引言	II
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 符号和缩略语	2
4.1 符号	2
4.2 缩略语	2
5 工艺特性	3
5.1 零件尺寸	3
5.2 PBF 工艺优势	3
5.3 PBF 工艺局限	4
5.4 经济性和效率	4
5.5 功能约束	4
5.6 尺寸、形状和位置精度	6
5.7 数据质量、分辨率、表示形式	6
6 设计准则	6
6.1 材料和结构特性	6
6.2 支撑结构	7
6.3 成形方向、位置和摆放	8
6.4 材料的各向异性	11
6.5 表面粗糙度	11
6.6 后处理	11
6.7 设计关注	12
附录 A (资料性) 本文件与 ISO / ASTM 52911-1:2019 结构编号对照情况	14
附录 B (资料性) 本文件与 ISO / ASTM 52911-1:2019 技术差异及其原因	16
附录 C (资料性) PBF-LB/ M 用原材料	17
附录 D (资料性) 应用案例	18
参考文献	22

前 言

本文件按照GB/T1.1—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。

本文件修改采用ISO/ASTM52911-1:2019《增材制造设计 第1部分：金属材料激光粉末床熔融》。

本文件与ISO/ASTM52911-1:2019相比，在结构上有较多调整。两个文件之间的结构编号变化对照一览表见附录A。

本文件与ISO/ASTM52911-1:2019相比，存在较多技术差异，在所涉及的条款的外侧页边空白位置用垂直单线(1)进行了标示。这些技术差异及其原因一览表见附录B。

本文件做了下列编辑性改动：

- 为与现有标准协调，将标准名称改为《增材制造设计 金属材料激光粉末床熔融》；
- 增加了缩略语“3D”和“2.5D”，更改了ISO/ASTM52911-1:2019的缩略语“PBF-LB/M”和“STL”的别称(见4.2)；
- 将ISO/ASTM 52911-1:2019中6.1.1的工艺优势内容合并到5.2、工艺局限内容合并到5.3，同时将ISO/ASTM 52911-1:2019中6.7.5的表面处理内容调整到6.6.2；
- 用资料性引用的GB/T 35352替换了ISO/ASTM 52915；
- 删除了ISO/ASTM 52911-1:2019中5.8的3MF的商业介绍；
- 增加了附录A(资料性)本文件与ISO/ASTM52911-1:2019结构编号对照情况；
- 增加了附录B(资料性)本文件与ISO/ASTM 52911-1:2019技术差异及其原因；
- 更改了ISO/ASTM 52911-1:2019表A.1的原材料牌号(见表C.1)；
- 删除了ISO/ASTM 52911-1:2019中6.9的应用案例，增加了我国的应用案例(见附录D)。

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。

本文件由中国机械工业联合会提出。

本文件由全国增材制造标准化技术委员会(SAC/TC 562)归口。

本文件起草单位：北京卫星制造厂有限公司、安徽拓宝增材制造科技有限公司、中机研标准技术研究院(北京)有限公司、江苏徐工工程机械研究院有限公司、华南理工大学、中国航发上海商用航空发动机制造有限责任公司、山东创瑞激光科技有限公司、华中科技大学、中国海洋大学、北京理工大学、上海材料研究所、中机生产力促进中心有限公司、北京星航机电装备有限公司、中国航发北京航空材料研究院、北京遥感设备研究所、中国商用飞机有限责任公司北京民用飞机技术研究中心、中国机械科学研究总院集团有限公司、北京汇天威科技有限公司。

本文件主要起草人：蒋疆、张成林、薛莲、何冰、王迪、侯慧鹏、吕忠利、闫春泽、祁俊峰、刘永辉、王潘丁、倪晓晴、尚耀明、焦世坤、梁家誉、朱荣全、王裕、朱政、尚鹏、贾闽涛。

引 言

金属材料激光粉末床熔融工艺(LB-PBF/M) 是金属增材制造工艺的一种, 已广泛应用于航空航天、医疗、模具、能源、汽车等领域。LB-PBF/M 的产品性能优异、材料利用率高, 能够缩短产品研制周期, 降低生产成本, 实现复杂零件一体化成形。由于成形材料的多样性, 决定了LB-PBF/M 工艺可满足不同特性、不同用途的多类型零件的成形需求。

LB-PBF/M 利用高能激光束的热效应使金属粉末材料快速熔凝, 逐层堆积获得三维实体零件, 一些未熔化的粉末, 通过筛分回收并与原始粉末混合, 可以在随后的成形过程中循环使用, 常用的金属粉末材料包括钛合金、铝合金、高温合金、不锈钢等。

LB-PBF/M 工艺与传统制造工艺(如减材、等材制造)相比, 在设计阶段关注的问题是不同。LB-PBF/M 没有类似传统工艺的限制, 为设计师和制造商提供了较高自由度, 但也需要了解该工艺的可制造性和局限性。

本文件描述了金属材料激光粉末床熔融的工艺特性和设计准则, 旨在为金属材料激光粉末床熔融设计提供指导和方法, 对用户将设计思想转化实体零件过程进行指导, 帮助设计者确定设计要素并充分发挥工艺优势。本文件能有效促进产品设计者掌握金属材料激光粉末床熔融的技术特点, 把握好增材制造产品设计的关键, 提升增材制造产品的质量和性能, 促进增材制造产业向更有序、更合理、更经济方向发展, 有很好的经济效益和社会效益。

增材制造 设计 金属材料激光粉末床熔融

1 范围

本文件规定了金属材料激光粉末床熔融的工艺特性和设计准则。

本文件适用于金属材料激光粉末床熔融工艺设计。

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 37698 增材制造 设计 要求、指南和建议 (GB/T 37698—2019, ISO/ASTM 52910: 2008, MOD)

3 术语和定义

3.1

3.4

3.2

3.5

3.3

GB/T <热致翘曲>由于散热不良或材料冷却凝固时的不均匀收缩导致的翘曲变形。

3535

1界

定的
以及

下表面区域 downskin area

下列

D

术语
和定

x 轴上法向量n 投影为负的(子)区域。

义适

注: 见图1。

用于

本文

件。

下表面夹角 downskin angle

8

翘曲

成形平台的平面与下表面区域(3.2)之间的角度。

效应

注: 见图1。

curl

effect

热应

力和

上表面区域 upskin area

残余

U

应力

轴上法向量 π 投影为正的(子)区域。

效应

ther

注: 见图1。

mal

and

resid

上表面夹角 upskin angle

ual

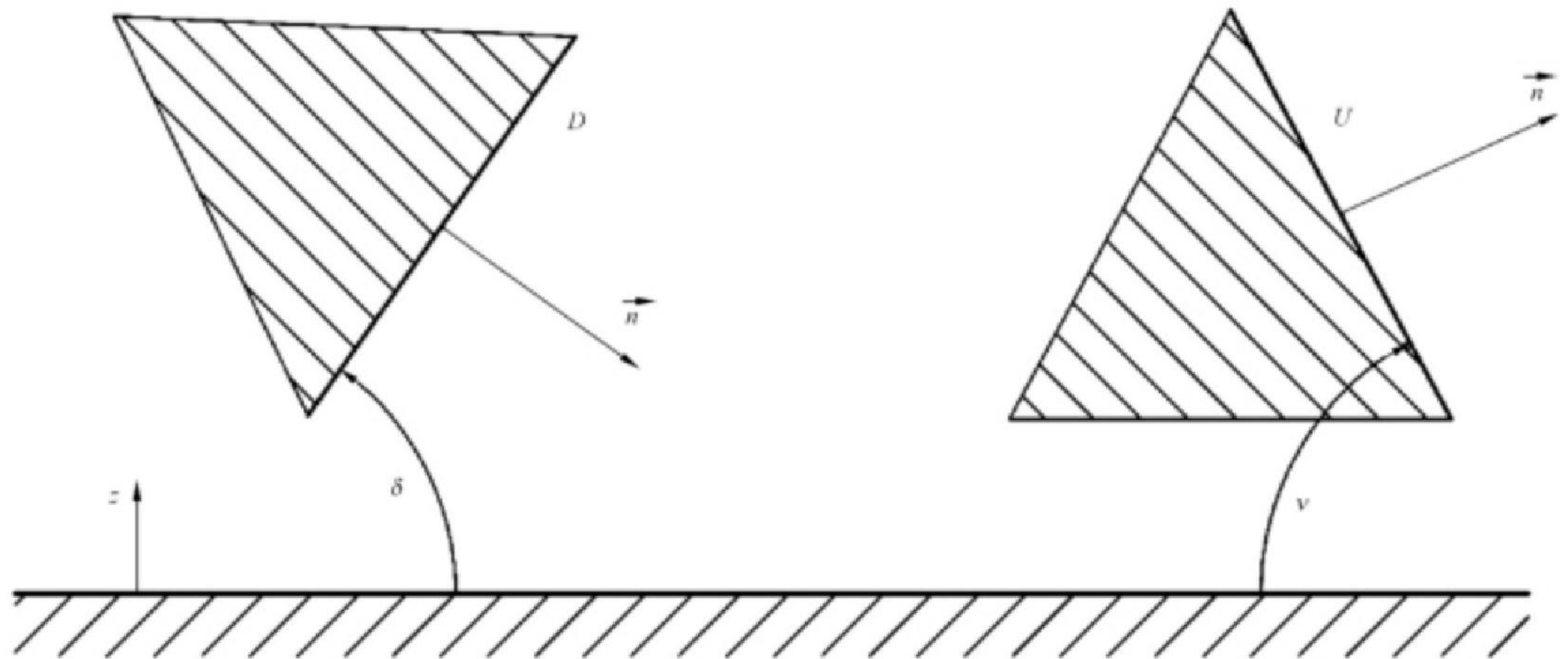
stress

effect

U

成形平台的平面与上表面区域(3.4)之间的夹角。

注：上表面夹角的值介于 0° （平行于成形平台）和 90° （垂直于成形平台）之间，见图1。



标引符号说明：

δ ——下表面夹角；

$\#$ ——法向量；

D ——下表面区域(左)；

U ——上表面区域(右)；

v ——上表面夹角。

图 1 零件表面相对于成形平台的方向

4 符号和缩略语

4.1 符号

表1中的符号适用于本文件。

表 1 符号

符号	物理量	单位
4	悬垂	mm
D	下表面区域	mm ²
I	岛状特征	mm ²
n	法向量	—
R,	轮廓的最大高度	μm
U	上表面区域	mm ²

δ	下表面夹角	(4)
U	上表面夹角	(*)

4.2 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

3D: 三维(Three Dimensional)

2.5D: 二维半(Two and a Half Dimensional)

AM: 增材制造(Additive Manufacturing)

AMF: 一种基于XML的增材制造数据文件格式(Additive Manufacturing File Format)

CT: 计算机断层扫描(Computer Tomography)

DICOM: 医学数字成像和通信(Digital Imaging and Communications in Medicine)

HIP: 热等静压(Hot Isostatic Pressing)

MRI: 磁共振成像(Magnetic Resonance Imaging)

PBF: 粉末床熔融(Powder Bed Fusion)

PBF-LB: 激光粉末床熔融(Laser-Based Powder Bed Fusion)

PBF-LB/M: 金属材料激光粉末床熔融, 又称选区激光熔融(Laser-Based Powder Bed Fusion of Metals, also known as Selective Laser Melting)

STL: 标准三角面片语言格式(Standard Triangulation Language)

5 工艺特性

5.1 零件尺寸

零件尺寸不仅受到粉末床熔融设备成形空间体积的限制, 同时由残余应力引起的开裂和变形问题、与零件的尺寸和体积直接相关的生产成本等因素也能限制最大零件尺寸。能够限制零件最大尺寸的一个重要因素是与零件的尺寸和体积有直接关系的生产成本。通过选择合适的零件摆放位置和成形方向, 嵌套尽可能多的零件, 能最大限度地减少生产成本。此外, 粉末体积成本、粉末再利用规则对生产成本有显著影响。

5.2 PBF 工艺优势

PBF 工艺为复杂设计产品提供了实现途径, 包括结构功能一体化产品、具有内部结构或通道的产品和具有无法通过铸造、锻造或金属切削工艺实现的底切结构特征产品。PBF 的灵活性为小批量具有独特特性的产品提供了实现途径, 这些特性不能用其他技术实现。

PBF 工艺更适合制造具有以下特点的零件:

- 在同一零件中实现多功能集成;
- 近净成形零件(即接近最终形状和尺寸);
- 零件具有高设计自由度。通常传统制造工艺存在局限性, 例如:
 - 工具的可达性;
 - 底切。
- 能够成形各种复杂的几何结构, 例如:
 - 自由几何形状;
 - 拓扑优化结构;
 - 填充结构;

● 内腔结构。

- 增材制造生产成本在很大程度上与零件复杂程度无关；
- 通过零件整合，能减少装配和连接过程；
- 通过局部调整工艺参数能选择性地设计整体零件特性；
- 减少从设计到零件生产的交货时间。

5.3 PBF 工艺局限

PBF 的限制因素包括所需材料的工艺性、零件的有限尺寸、关键应用技术的批准、生产成本和可能的后处理需求。

在产品的设计过程中，通常应关注与AM 过程相关的以下工艺局限：

- 由于局部温度差异，造成的收缩、残余应力和变形；
- AM 零件的表面质量通常受逐层堆积(阶梯效应)的影响，根据具体应用场景可能需要后处理；
- 应关注零件的形状、尺寸和位置公差，为后加工提供加工余量，可以通过精密的后处理来达到指定的几何公差；
- 各向异性通常是由于逐层堆积而产生的，在工艺设计中应予以关注；
- 并非所有可用于常规工艺的材料都适用于 PBF 工艺；
- 材料性能可能与其他工艺(如锻造和铸造)现有水平不同，工艺设计和过程控制能对材料性能产生显著影响；
- 过度使用和/或过度依赖支撑结构会导致大量的材料浪费和增加成形风险；
- 应进行粉末清理。

5.4 经济性和效率

如果零件几何结构允许以尽可能经济高效的方式放置在成形空间中，则根据计划的零件数量，使用各种不同的优化准则。

在一次成形过程中，高度是对成形时间和成本影响最大的因素。在保证产品质量的前提下，零件的定位方式宜采用产品高度值最小的方位。

如果成形大量制件，则宜尽可能有效地利用设备成形空间，选择一次能摆放更多零件的成形方向，以减少所需的成形次数，还能应用嵌套策略，以最大化利用成形的高度空间。如果为达到最佳成形效率，相同零件的成形方向不同，即相同零件以不同的角度和摆放位置成形，则零件的机械性能能有所不同。

系统中剩余粉末的使用取决于应用、材料和具体要求。更换粉末会导致既低效又耗时。虽然在改变材料类型时更换粉末是必要的，但在管控规范允许下，如果材料类型不变，粉末能够重复利用。然而，需要注意的是，粉末的再利用会影响粉末的粒度分布、表面特性和化学成分，进而影响最终零件的特性。粉末可重复利用次数与设备制造商和零件规格等因素密切相关。

许多不适合 AM 的零件(特别是针对传统工艺设计而增材制造工艺性不佳的零件)都需要特定的成形方向，以最大程度地减少支撑的使用或增加成形成功率。实际上，为增材制造而设计的零件宜设计成具有明显和/或特定的成形方向。

5.5 功能约束

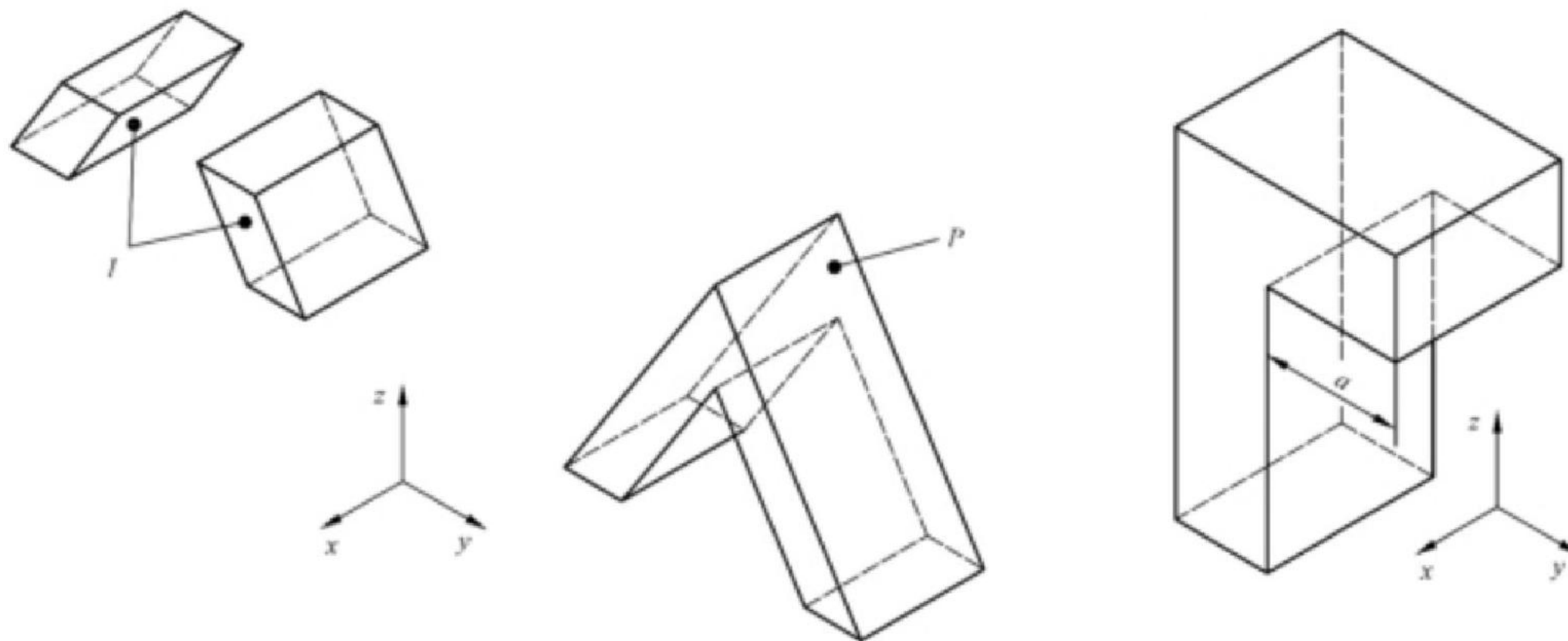
5.5.1 一般要求

由于 AM 零件是逐层成形的，因此特征的分离可能会在成形的某个阶段发生，这取决于零件的几何形状。从某种意义上说，5.5.2~5.5.4中描述的情况视为关键情况(关键程度取决于PBF 技术类型)。

5.5.2 岛状特征

岛状特征(I) 是仅在成形过程的后期阶段才连接形成零件(P) 的特征。在模型设计阶段应关注什么情况下发生岛状特征连接，即使设计的整体结构非常稳定的零件在成形岛状特征过程中也可能不稳定(见图2左侧和中间)。

注：在某些情况下，在粉末铺展过程中未对岛状特征进行损伤防护，可能导致岛状特征变形。



标引符号说明：

I—— 岛状特征；

P—— 零件；

a —— 悬垂。

图 2 零件 P 成形期间在Z 轴方向的岛状特征I（左）和悬垂 a（右）

5.5.3 悬垂

悬垂角为 0° 的区域产生长度为a 的悬臂(见图2右)。小的悬垂不需要支撑结构，悬垂区域在成形期间是自支撑的。悬臂长度a 的许用值取决于粉末床熔融工艺、材料和使用的工艺参数，过长的悬臂会引起图2的a 结构坍塌或变形，这可能导致设备非正常打印或停机。

5.5.4 阶梯效应

因增材制造采用逐层叠加方式，零件的3D 几何形状在生产之前通过沿成形方向的离散分层被转换为2.5D 图像。该2.5D 图像与原始几何结构偏差引起的结果误差被称为阶梯效应。其大小在很大程度上取决于分层厚度(见图3)。

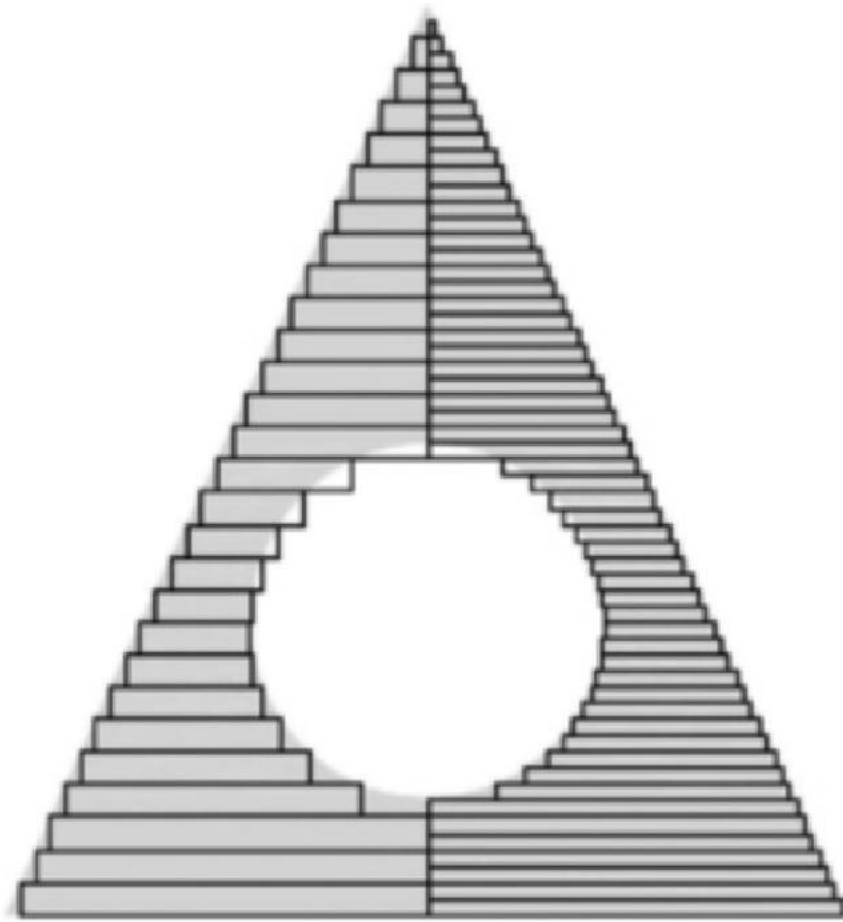


图 3 不同层厚度对阶梯效应的影响

5.6 尺寸、形状和位置精度

通常情况下，粉末床熔融成形零件难以获得良好的公差，因此，必要时对零件进行后处理以满足(客户)精度的要求。后处理包括减材制造(如表面精加工)、热处理或GB/T37698 中规定的其他操作。

需要关注影响最终零件特性的工艺参数。例如，由于采用逐层堆积方式制造，零件能发生各向异性收缩，零件成形方向与最终成形精度密切相关。又如，零件在成形平台上的位置可能影响分层一致性。

5.7 数据质量、分辨率、表示形式

使用增材制造技术需要三维几何数据，通常为网格化模型，但也可能使用其他表示形式，包括体素或切片层表示形式。对于网格化模型数据，其文件是将零件的表面几何形状描述为一系列三角形网格面片。三角形面片的顶点通过右手定则和法向矢量进行定义。STL 文件格式被认为是准行业数据交换格式，其他格式包括AMF(在GB/T 35352中进行了描述)和3MF。

在网格化模型中，利用三角形面片逼近三维实体表面，因此三角形面片的大小决定了要制造的零件的几何质量。如果三角形面片太大，STL 文件中定义的三角形面片之间的连接将会不够光滑。相反，三角形面片太小则需要占用大量的数字存储空间，并且使用处理软件进行传输和处理的速度很慢。三角形网格化的分辨率通常受到“弦高”参数的影响，它描述了零件表面上的点与三角形面片之间的最大偏差。因此，“弦高”参数的值越小，三角形面片与实际零件表面的偏差就越小。一个典型的经验法则是将公差设置为至少比 AM 处理分辨率小5倍。因此，对于大多数 PBF 工艺，建议将弦高设置为 0.01 mm~0.02 mm。根据系统的不同，可能使用其他参数设置网格分辨率。

AMF 支持的信息不仅限于几何图形，还包括其他信息，例如，支持零件单位(mm、m、in)、颜色、材料和晶格结构。STL 文件仅包含三角网格化的几何图形，而3MF 文件具有 AMF 的某些元数据表示功能。将单位包含到数据交换文件中对于传达零件尺寸非常重要。

如果零件几何数据来自3D 成像设备(如 CT 或 MRI)，那么该三维几何数据由体素组成。DICOM 格式是医学成像行业使用的标准格式，某些AM 软件工具能够直接读取DICOM 文件，并将其转换成三维几何模型。在此过程中，三维几何模型的分辨率取决于成像仪的分辨率。

6 设计准则

6.1 材料和结构特性

金属和金属合金是 PBF-LB/M 最常用的材料(见附录 C)。制备金属粉末的优选方法通常有等离子雾化法、气体雾化法、旋转电极法 PREP 等。由于供应商之间的金属粉末性能差别很大，选择时宜关注粉末粒度分布、化学成分、外观质量、球形度、流动性、密度、夹杂物和空心粉率等粉末原材料特性。

材料的可焊性、熔点、导热系数、熔体黏度和润湿角(与熔池的表面张力有关)等因素都会影响成形零件特性。此外，PBF-LB/M 工艺设计也需要关注成形环境。

表C.1 给出了 PBF-LB/M 过程可选择的材料类别。除了表中的材料，还有一些其他材料也能使用，如铜合金、金和银、钨和钽。

PBF-LB/M 工艺可以实现接近100%的致密度。图4描绘了PBF-LB/M 成形后的微观组织：

——显示了由 AlSi10Mg 材料制成的金相试块横截面的显微组织(xy 向)；

——显示了由 AlSi10Mg 材料制成的金相试块纵截面的显微组织(xz 向)。

由 PBF-LB/M 工艺产生的微观组织不同于在锻造材料中观察到的微观组织，并且在很大程度上取决于加工环境，包括上述因素。零件的机械性能与所形成的宏观形貌和微观组织直接相关。

金属增材制造零件的热处理通常用于降低残余应力和调控材料性能。

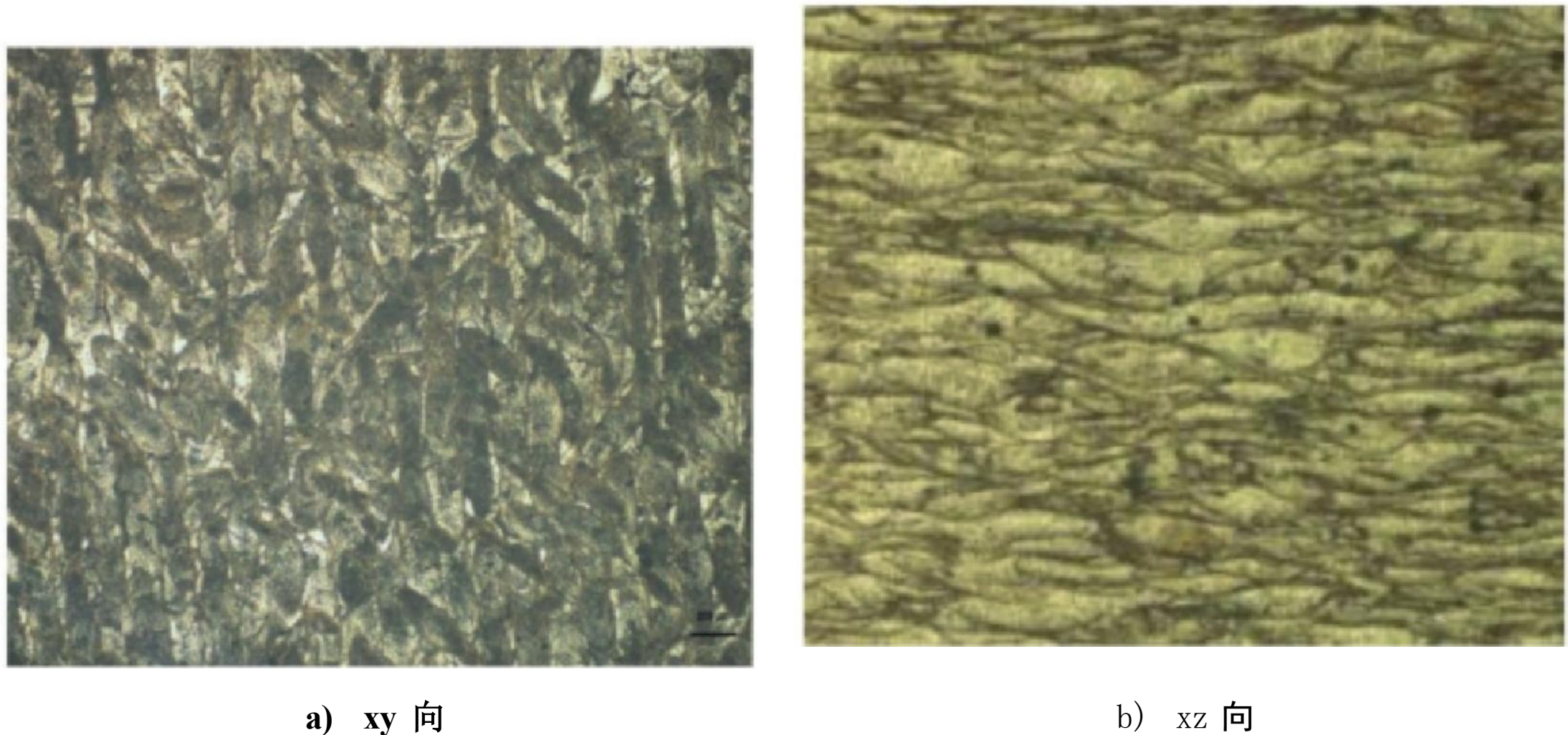


图 4 PBF-LB/M 成形后的显微组织
(材料: AISi10Mg, 退火态)

6.2 支撑结构

PBF-LB/M 工艺要求零件牢固地连接到基板上。可以直接(直接在成形平台上打印)或通过支撑结构进行连接。PBF-LB/M 过程中的支撑结构具有多种功能,包括:

- 散热;
- 将零件固定到成形平台;
- 补偿残余应力引起的翘曲;
- 作为成形零件的临时支撑。

虽然支撑结构在许多 AM 工艺中很常见,但其具体结构形式取决于增材制造工艺类型。表2给出了 PBF-LB/M 工艺中使用支撑结构的一般指导原则。

由于支撑结构设计非常重要,因此设计人员在早期宜明确特定 PBF-LB/M 设备的零件成形方向,并了解成形所需的工艺过程核心要素。当有不同设计方案时,可关注支撑设计的影响。例如,设计方案可能会导致成形时间增加,但是有可能显著减少后处理中移除支撑结构的工作量。

表 2 支撑结构的一般指导原则

		左: 通过支撑将零件连接到成形平台。
--	--	--------------------

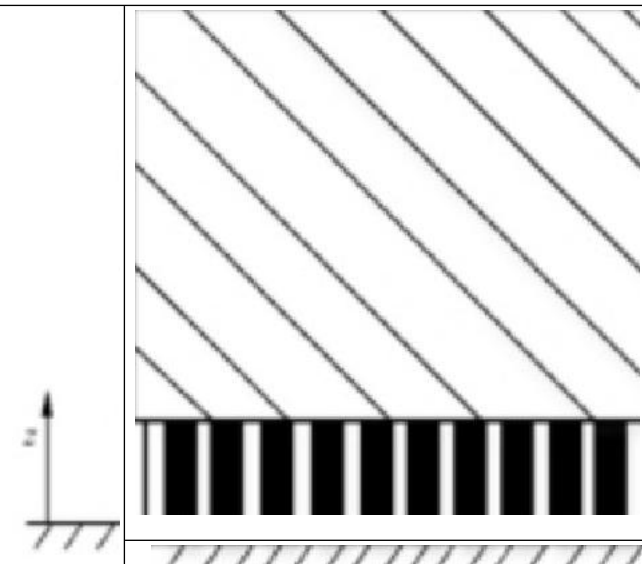
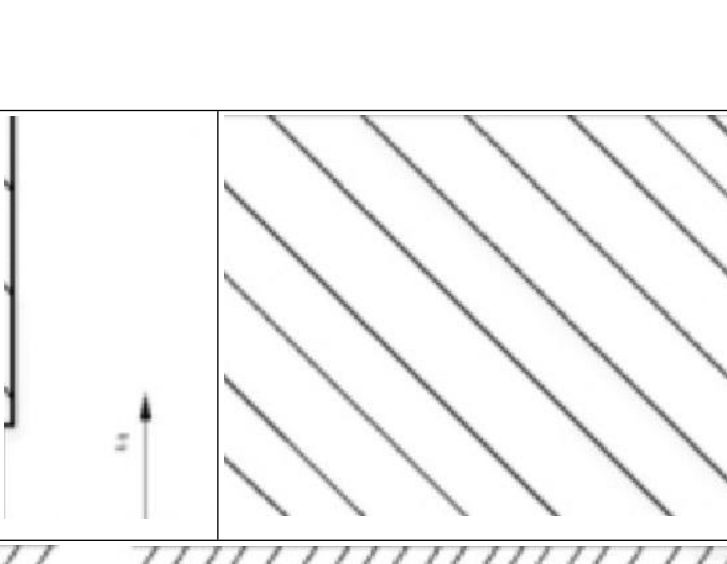
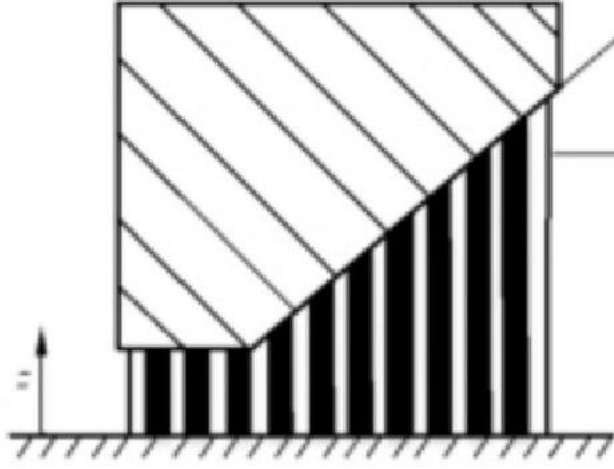
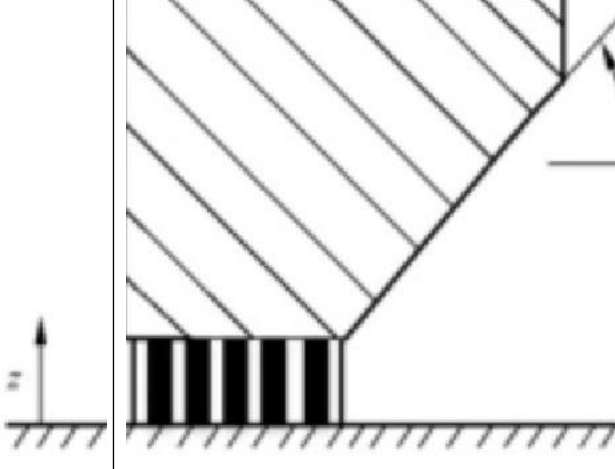
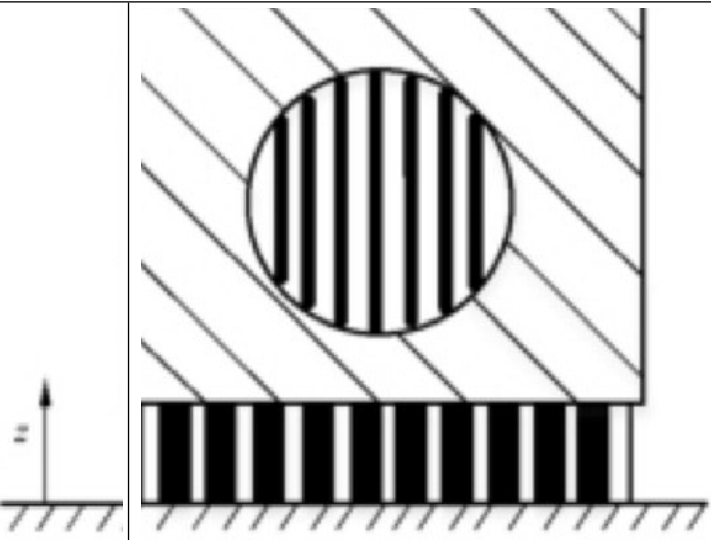
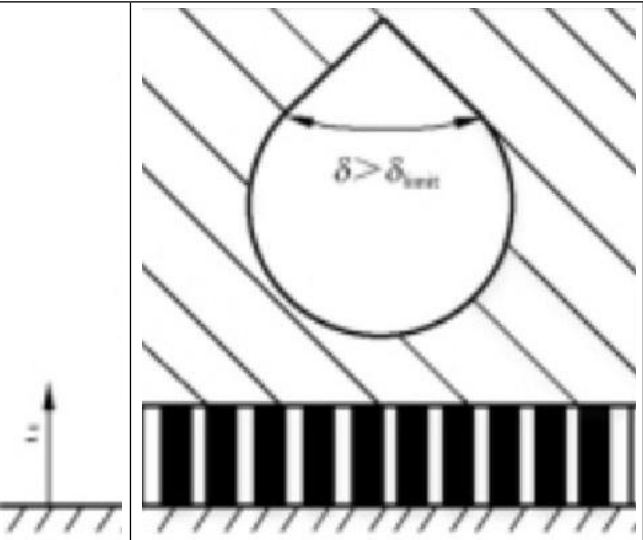
		<p>右：零件直接连接到成形平台</p> <p>注1：为了避免出现开裂，有可能在零件和基板之间设置圆角。</p> <p>注2：当将零件直接连接在基板上时，通过线切割去除，可能会由于残留粉末和不均匀的切割动作，使零件从基板上移除时比较复杂。</p>
---	--	---

表 2 支撑结构的一般指导原则(续)

		<p>左：具有下表面夹角$\delta < \delta_{\text{mit}}$的面需要支撑结构。通常，在$30^\circ \sim 45^\circ$之间。$\delta_{\text{mit}}$取决于原材料、工艺、零件特征(如厚度、形状等等)，</p> <p>右：具有下表面夹角$\delta > \delta_{\text{mit}}$的面不需要支撑结构。角度的不同会影响表面质量</p>
		<p>左：带内部支撑结构的孔。</p> <p>右：根据参考修改孔的形状以避免使用支撑结构</p> <p>注：如果成形后需要打孔，这种形状很难加工。因此，在某些情况下，能够减少孔的直径(通常直径小于8 mm不加支撑)，以便在没有支撑和打孔时制造，或者不预设孔位，完全由打孔替代。</p>

6.3 成形方向、位置和摆放

6.3.1 一般要求

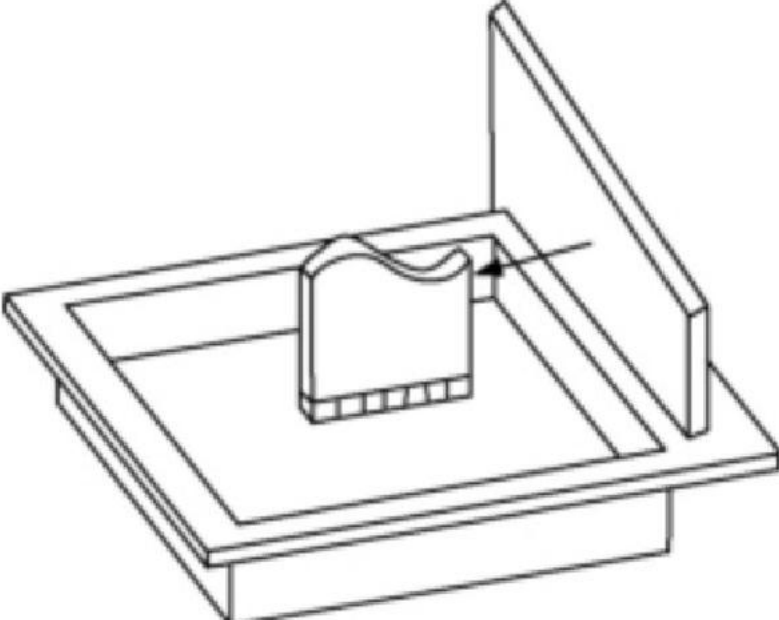
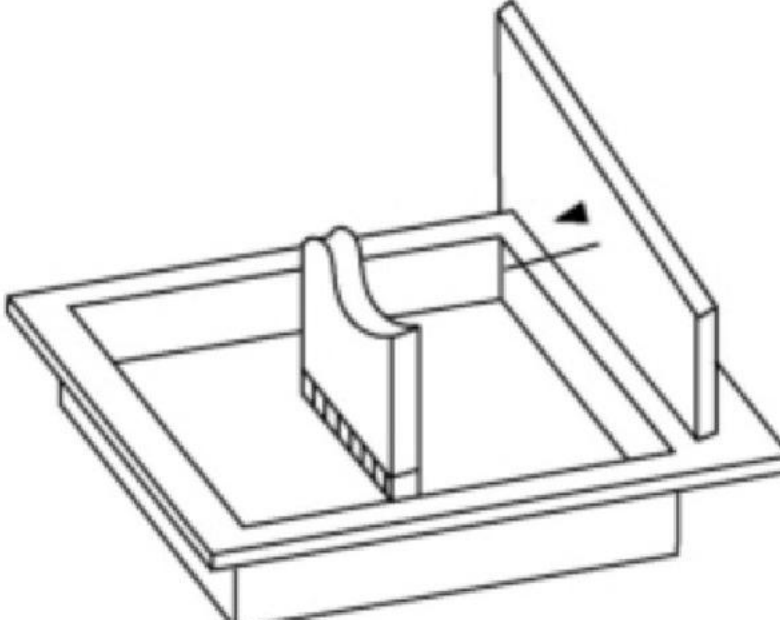
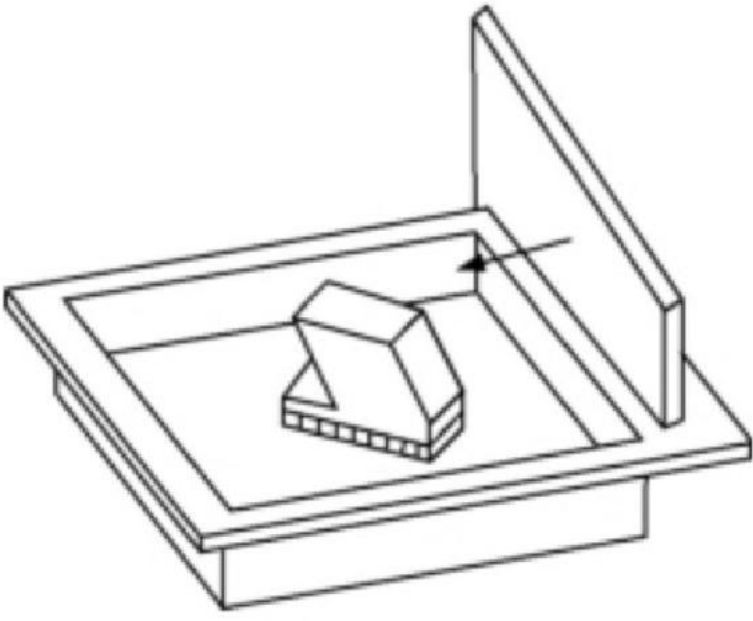
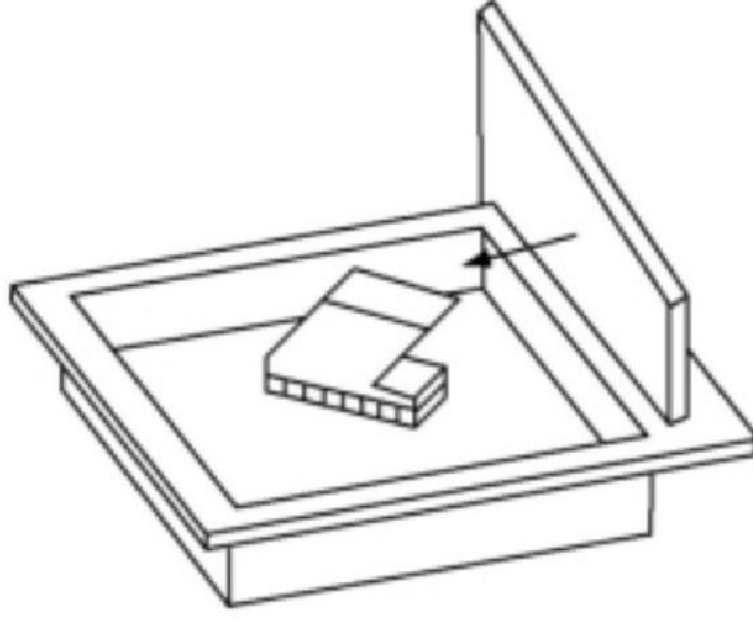
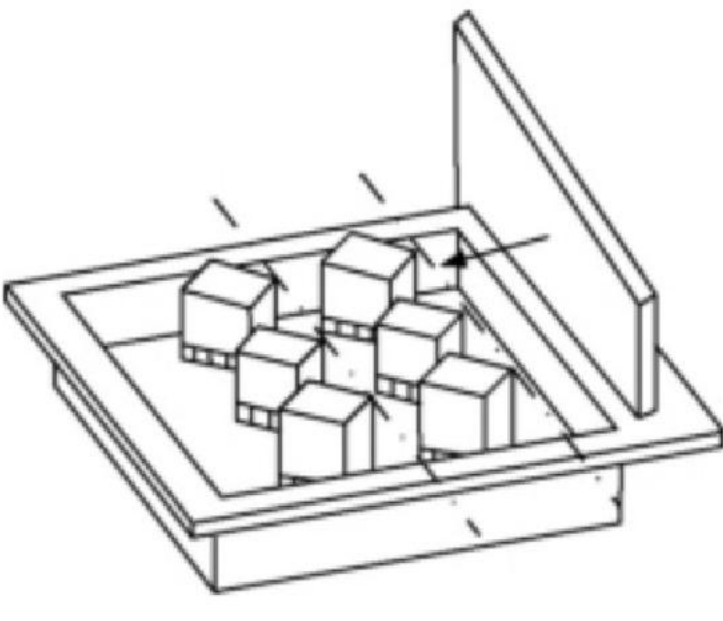
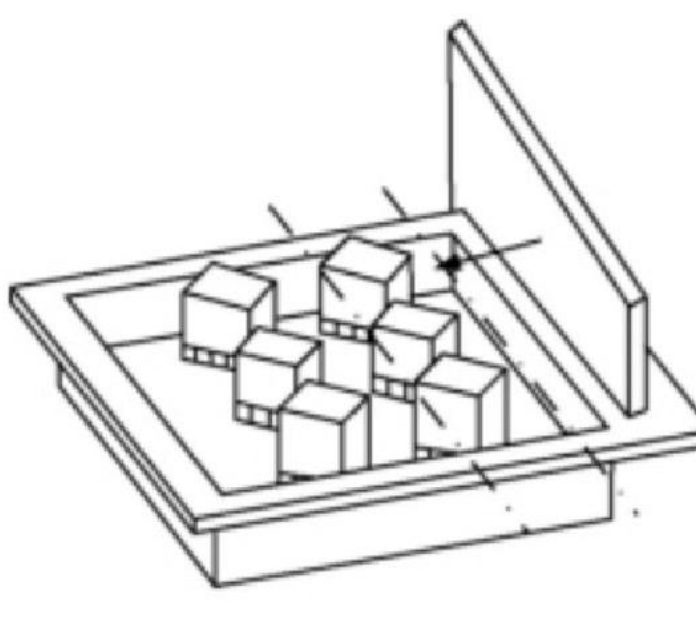
PBF-LB/M 零件的成形方向、位置和摆放会影响成本、工艺稳定性和各零件特性，在6.3.2~6.3.4中给出了用于确定合理摆放方向、位置和排布的关键要素和相关示例。

6.3.2 铺粉过程

因大多数 PBF-LB/M 系统使用具有铺粉装置(如陶瓷、金属刮刀、辊子或毛刷)的粉末供给系统，将粉末从供料室推动，推过成形工作面，并进入回收粉区域。根据分层厚度，在铺粉过程中，铺粉机构通常会刮擦或扰动零件。零件应采用合适的摆放方向、位置和排列布置方式，以便最小化铺粉过程中产生的摩擦力。宜关注以下几点(见表3)：

- 纵向几何特征不宜平行于铺粉机构，而适合沿着铺粉方向；
- 零件关键几何特征的倾斜方向宜尽可能不与铺粉方向相反；
- 多个零件的排列布置宜确保与铺粉系统接触长度最小(以偏移方式排列，见表3的最后一行)。

表 3 在设备成形空间中零件摆放的关键要素

描述	推荐	不推荐
<p>纵向几何特征</p> <p>纵向几何特征适合采用与铺粉机构接触长度最小的方向作为摆放方向</p>		
<p>关键几何特征</p> <p>在摆放时应注意关键几何特征，防止发生刮刀碰撞造成零件翘曲。一般合适的摆放角度是10°</p>		
<p>多个零件</p> <p>多个零件应采用与铺粉系统接触长度最小化的方式分布(以偏移方式排列)</p>		

6.3.3 支撑结构设计

支撑结构应根据成形方向和产品形状确定其数量，并保证在支撑结构、效率、工艺稳定性和零件质量之间取得平衡。表4提供了支撑结构设计示例。一般情况下，宜注意支撑和零件之间的接触面设计(完全接触或线接触)，并关注成形后如何去除支撑结构(手动、机加工、线切割等)。

支撑结构能设计成各种形状(如块形、树枝形)和密度(如间隙宽度、树枝直径)。零件和基板之间并不总是需要设计支撑结构。如果零件具有大面区域，在大面区域和被支撑面之间设计用于支持微细特

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/878043022072006063>