

## 最优激光工艺 — 计算金属增材制造零件的理想工艺参数

雷尼绍增材制造应用总监 Marc Saunders 阐释了如何计算金属增材制造 (AM) 零件的理想工艺参数。本文探讨了激光粉末床熔融 (LPBF) 工艺参数选择的考量因素，以及这些因素如何定义“操作窗口”。我们还将分析加工过程对零件几何形状变化的灵敏性，这也是我们针对具体应用选择特定参数的原因。

LPBF 是一种多用途的增材制造技术，可直接从 CAD 文件生产出复杂的金属零件，无需昂贵的模具，并且能够最大程度减少材料浪费。选择用于熔融和固化金属粉末的工艺参数至关重要，因为合金的热反应会影响其完整性和强度。正确选择适合所加工材料和特定零件的参数是加工成功的关键，尤其是在批量生产应用中。

### LPBF 概述

激光粉末床熔融是将高能掺镜光纤激光束聚焦成一个小的光斑，使之具有足够的能量强度以完全熔融金属粉末薄层。通过一对扫描振镜使激光在粉床上移动，金属粉末在激光的作用下熔融并与下层及相邻的区域凝固相连，形成一道熔池。保护气流流过加工托盘，保护热金属免于氧化，并安全地清除烟尘。

焊道的宽度大于激光光斑（大约是光斑直径的 2 到 3 倍），因为激光产生的热量会传导到周围的粉末颗粒，并将它们熔融到移动熔池中。多条熔融轨道相互连接又重叠，形成一个与零件的分层相对应的固态金属层。熔融轨道必须足够深，才能部分重熔下方的金属层，以形成完全致密的固体结构。LPBF 就是以这种方式逐层构建零件。

### 连续波和调制激光熔融

金属粉末熔融主要有两种技术 — 连续波和调制扫描。连续模式，顾名思义，是指连续不断地传输激光能量以熔融粉末。这种技术采用的方法是引导激光光束来回扫描粉末床表面，使金属粉末固化。由于扫描线重叠，因此每次连续扫描都会部分重熔前一条扫描线，从而凝固成焊材。

在调制模式下，激光器的工作方式略有不同。通过重复打开和关闭激光器产生一系列曝光，并且两次曝光之间有短暂间隔（10 - 20 微秒）。每次曝光的区域都会与上一次曝光的区域部分重叠，从而形成近似的扫描线。这些扫描线高效扫过粉末床，以固化粉末成型金属。

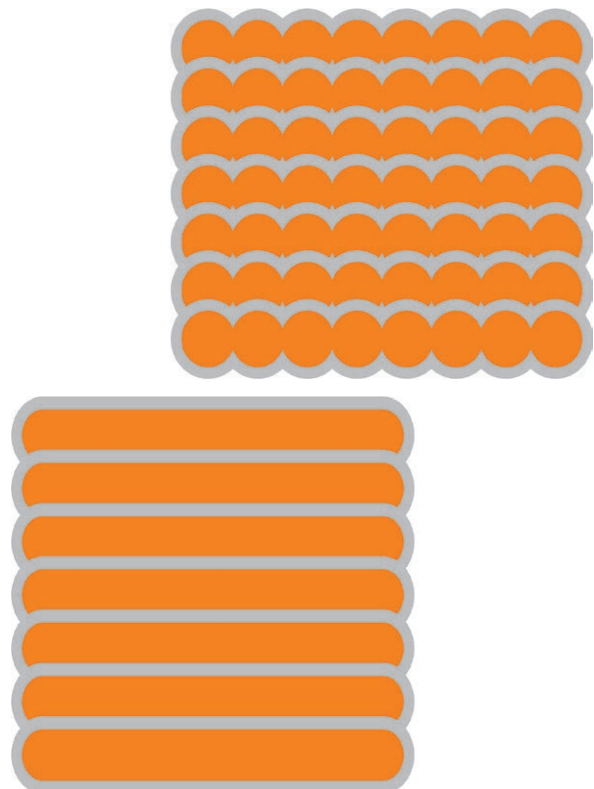


图1 — 连续波激光扫描（左下）包含一系列重叠的扫描线，每条扫描线都是由激光连续熔融形成的。调制激光器通过一系列相继曝光达到相同的效果（右上）。

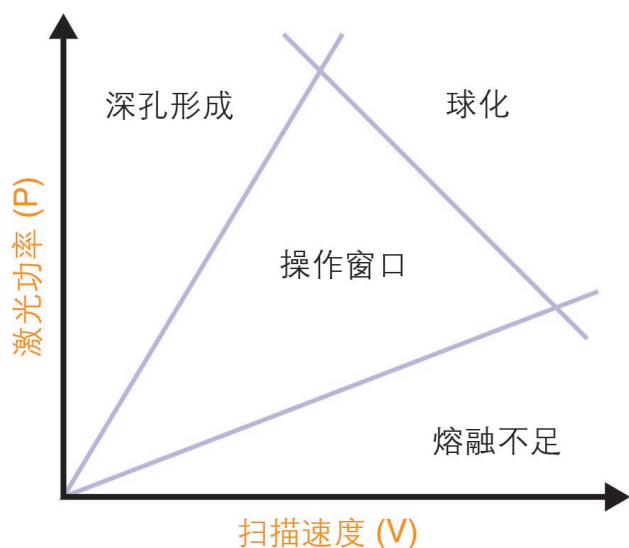


图2 — 激光功率与扫描速度关系图 — 工艺结果是如何随参数选择而变化的。

## 工艺参数基本介绍

将激光能量传输到粉末床上的方式取决于工艺参数。这些参数决定了能量强度和扫描速度。关键参数有：

- 激光功率：激光器在每单位时间内发射的总能量。
- 光斑尺寸：聚焦激光束的直径 — 可以固定也可以编辑，取决于机器的聚焦系统。
- 扫描速度：光斑沿扫描矢量在粉末床上移动的速度 — 由调制激光系统的点距离和曝光时间决定。
- 扫描线距离：相邻扫描矢量之间的间距，以便对上一条焊道进行一定程度的重熔，从而确保完全覆盖待熔区域。
- 层厚：每个待熔新粉末层的深度。

以上参数均可单独调整，因此参数选择是一种多变量选择。

## 确定“操作窗口”

选择参数的首要考虑是制成质量均匀的全致密零件。零件密度是熔融质量的关键指标 — 如果存在孔隙，则无法达到要求的强度、延展性和抗疲劳/抗蠕变性能。但是，如何在不计其数的参数中选择正确的组合呢？

化繁为简，事半功倍。对于每个给定的加工件，粉末的化学特性和粒度分布都是已定的。根据零件的精细程度和表面光洁度要求还可以确定层厚。在激光光斑

尺寸（很多设备不允许在加工期间更改光斑尺寸）确定之后，只需要选择激光功率、扫描速度和扫描线距离即可。

下文说明改写自以下文章的研究成果：Towards optimal processing of additive manufactured metals for high strain rate properties（通过金属增材制造零件的优化加工实现高应变率特性），Robert M. Suter, He Liu, A.D. (Tony) Rollett, presented at SSSAP Chicago, April 2017. [1]

一种解决方法是在P-V坐标系中绘出激光功率(P)与扫描速度(V)的关系。如图2所示，参数选择会影响工艺结果。

如果扫描速度过快，而激光功率过小，那么零件的某些区域可能无法完全熔融，导致因“熔融不足”而产生孔隙。相反，如果以选定的速度施加的功率过大，则可能会使熔池过热，能量渗透过深，导致出现“深孔”效应。

在这两个极端情况之间是一个“操作窗口”，在这个范围内能够获得良好的零件密度。在这个窗口内，激光能量足以完全熔融粉末及其下方的金属层，而又不会渗透过深。

从图2可以看出，同时增加激光功率和扫描速度可提高加工效率，这在某种程度上是可行的。但是，功率和速度都有一个限度。一旦超过这个限度，熔池就会变得不稳定，并且会产生一种“球化”效应。激光功率增大时，飞溅物也可能增加。

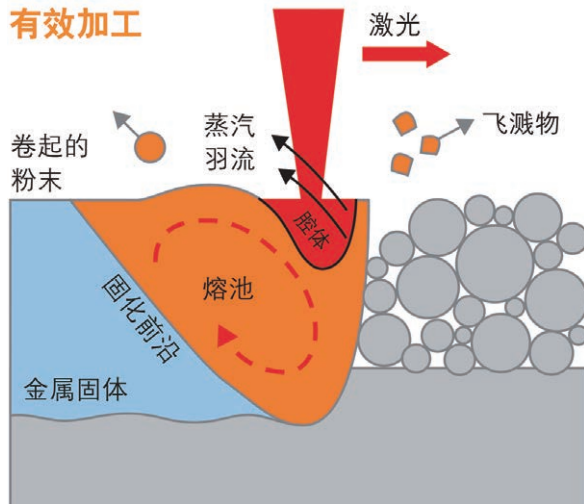


图3 — 在最优速度和功率组合条件下，形成稳定的熔池，渗透到正确的深度，实现高效加工。

### 在“操作窗口”内加工

P-V坐标图上的中央“操作窗口”是正确的速度和功率组合，可产生最佳尺寸的稳定熔池，如图3所示。在这种组合条件下，激光能量被粉末有效吸收，形成足够深度的熔池，与下方的金属层牢固融合，同时又避免过度重熔。

在这个加工区中，激光反冲压力会产生一个浅腔。激光移动加热腔体正面，产生垂直于表面（即向上和向后）喷射的金属蒸气羽流。由于浅腔中不存在内部反射，因此不会发生过度熔融。热能被传导到熔池中，由于池内的高温梯度和表面张力，熔池出现一定程度的湍流。这种流动会导致某些物质以焊接飞溅物的形式喷出。

移动的蒸气羽流在熔池周围产生一种类似于气象系统的环境。它可以从焊道周围卷起粉末，通过伯努利效应将粉末拉入激光束中，然后向外喷出。粉末在穿过激光时会有一部分被熔融，而剩余粉末则在激光束附近被像“风”一样的诱导气流吹散。

### 熔融不足

如果以给定的速度施加的功率过小，那么熔池将变小。这意味着固化速度变快，而湍流变小，飞溅物减少。蒸气羽流将变弱，因而卷起的粉末量也会减少。

这样的缺点是，较低的激光能量可能无法渗透足够的深度，因而不能完全熔融粉末层及其下方金属固体的最顶层。如图4所示，这会在下方遗留未熔融的粉末，从而导致孔隙过多和分层风险。

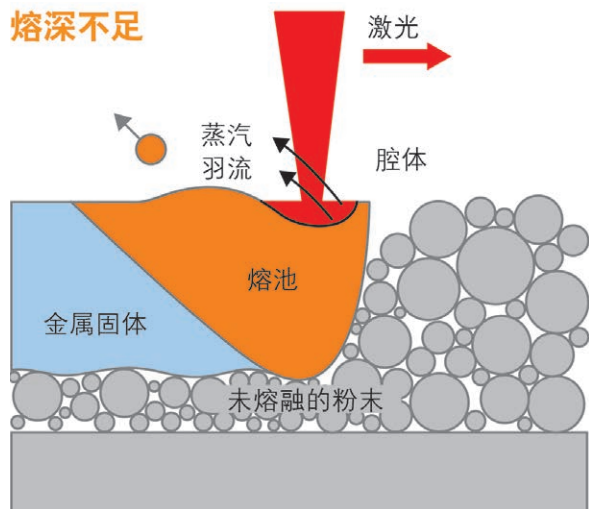


图4 — 激光能量渗透不足会遗留未熔融的材料，造成零件瑕疵。

## 深孔形成

如果以给定的速度施加的功率过大，激光会过度穿透到粉末层下方的金属层中，导致形成深孔。这种情况下会在表层形成深腔，而且深腔上的金属蒸气喷射会更加垂直。腔体内部的激光能量内部反射会将更多的热量传导到材料中更深的位置，导致熔池更深、持续时间更长。能量输入增加将导致熔池湍流变大，飞溅物增加，同时“气象系统”更加剧烈，卷起更多粉末。

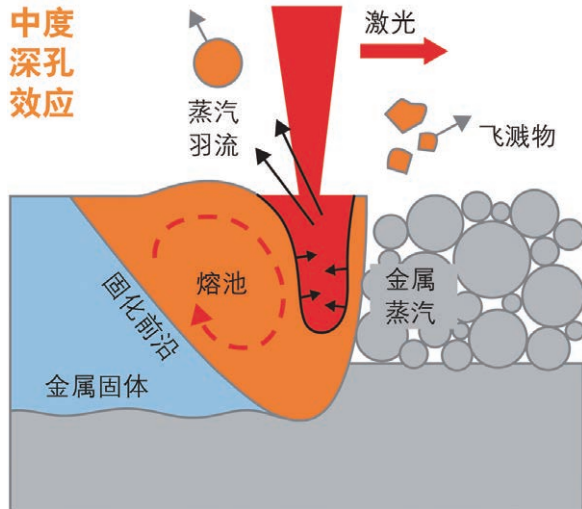
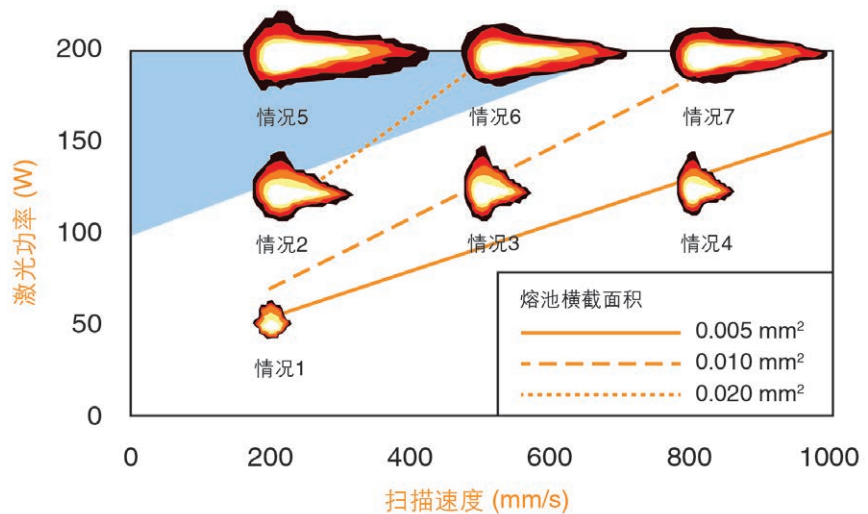


图5 — 中度深孔效应 — 高能激光光斑形成深腔。

如果深孔不稳定（受功率、扫描速度和熔池动力学影响），熔池会在腔体上塌陷，导致底部形成惰性气孔。当熔池凝固时，这些气孔可能不会闭合，因而在金属固体中产生表面下孔隙。下方的金属层也会发生更大程度的重熔，进而影响已固化材料的微观结构。

图7 — 在P-V坐标系中的不同点，镍基合金熔池尺寸的实验测量结果。图中左上方阴影区的功率和速度组合（特别是情况5）是深孔形成区。参考文献：MSEC2017-2942 Measurement of the melt pool length during single scan tracks in a commercial laser powder bed fusion process (商用激光粉末床熔融工艺中单道扫描的熔池长度测量结果), J.C. Heigel, B.M. Lane. [2]



美国国家标准与技术研究院 (NIST) 的实验结果证明了参数选择对熔池尺寸的影响 — 见图6。

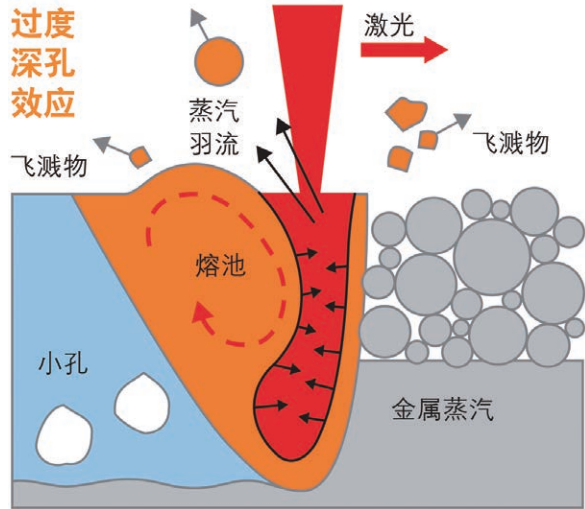


图6 — 过度深孔效应 — 腔体过深会在零件表面下形成小孔。

在使用红外摄像机从上方测量镍基合金熔池时，他们观察到：以不同的扫描速度施加相同的激光功率时，熔池长度大致恒定。然而，随着速度降低，熔池变宽，面积也随之变大。在这项研究中，以从200 mm/秒到800 mm/秒不等的速度施加200 W的激光功率时，熔池的长度大约为0.6 mm。在较慢的扫描速度下形成的更宽（因而更深）的熔池具有更多的热能，因此固化时间更长 — 在下方图7中的最极端情况下，时间长达3 ms。

## “球化”

当扫描速度过快时，熔池会变得不稳定。高表面张力梯度会导致在激光束后面形成空隙，这些空隙会随着激光的移动而扩大，从而导致熔池分解，并最终固化成多个不相连的球体，如图8所示。

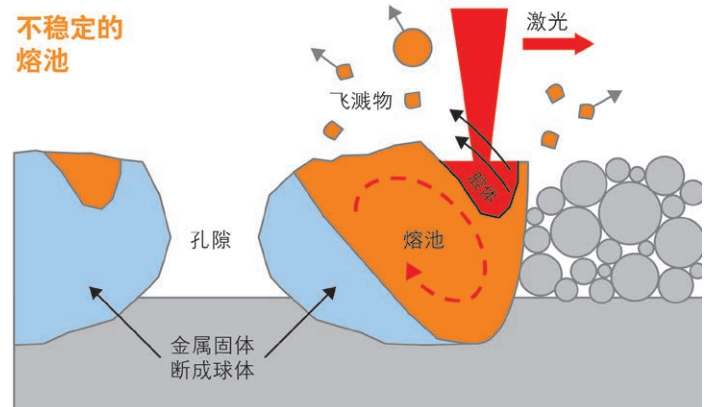


图8 — 扫描速度过快导致熔池不稳定。

## 固化与微观结构

以上探讨了LPBF工艺的熔融特性及其对零件密度的影响。然而，对于金属零件的性能特征形成而言，最关键的是固化过程。固化过程决定微观结构，进而形成材料特性。

许多合金很复杂，可能在不同的温度和构成下以多相形式存在，因此不会一次全部固化，而且通常也不会在焊道内均匀固化。在容易散热的位置冷却速度非常快，并且大部分热量会从熔池中传导到周围的固态金属中。而相对较少的热量会散发到附近的未熔融粉末中，或者通过辐射散发到加工舱中。

随着熔融金属冷却下来，熔池外部区域的温度也下降到液相线温度以下，这时合金的一个或多个相将开始固化。熔池的外边缘会形成蜂窝状树枝晶体，并向中心生长。残余的液相滞留在这些初级树枝晶体之间，在达到其更低的熔点时才会固化。对向的蜂窝状树枝晶体生长前沿形成了单独的晶界，剩余的液相也会在晶界中聚集。

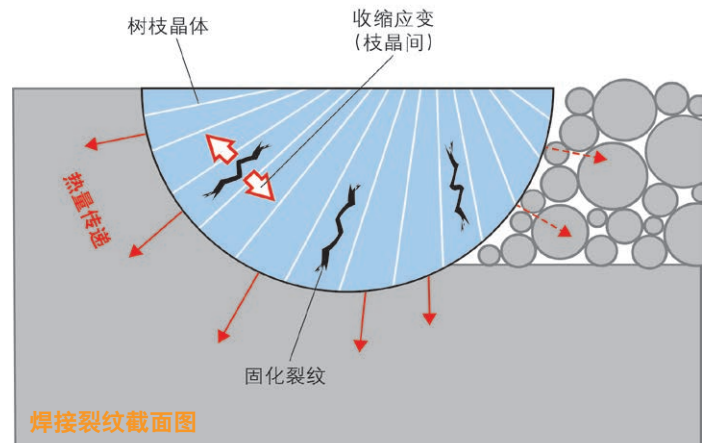


图9 — 冷却的树枝晶体在“糊状”区域发生应变，产生固化裂纹。

冷却过程会在这些蜂窝状和晶界区域施加应变，通过某些材料中的“热撕裂”或固化裂纹过程，可能会产生不应该存在的孔隙。如果不同相的固化温度差异很大，就会出现最糟糕的情况。

正如所见，熔池的尺寸、持续时间和冷却速度很重要，因为这些因素决定材料的热反应。持续时间较长的熔池冷却速度较慢，会产生比较粗糙的微观结构，晶粒更大，树枝晶更厚。相比之下，较小的熔池冷却速度较快，可形成较为精细的微观结构。

较深的熔池也会导致已固化的金属发生更大程度的重熔，进而影响其微观结构。较高的激光功率会导致形成更长的柱状垂直晶粒，每个晶粒都跨越多层。由于较深的熔池与下方的金属固体有较大的接触面积，因此更多的热量向下传导，导致在垂直方向上形成更多晶粒。这会造成垂直与平行加工方向的机械特性差异加大。

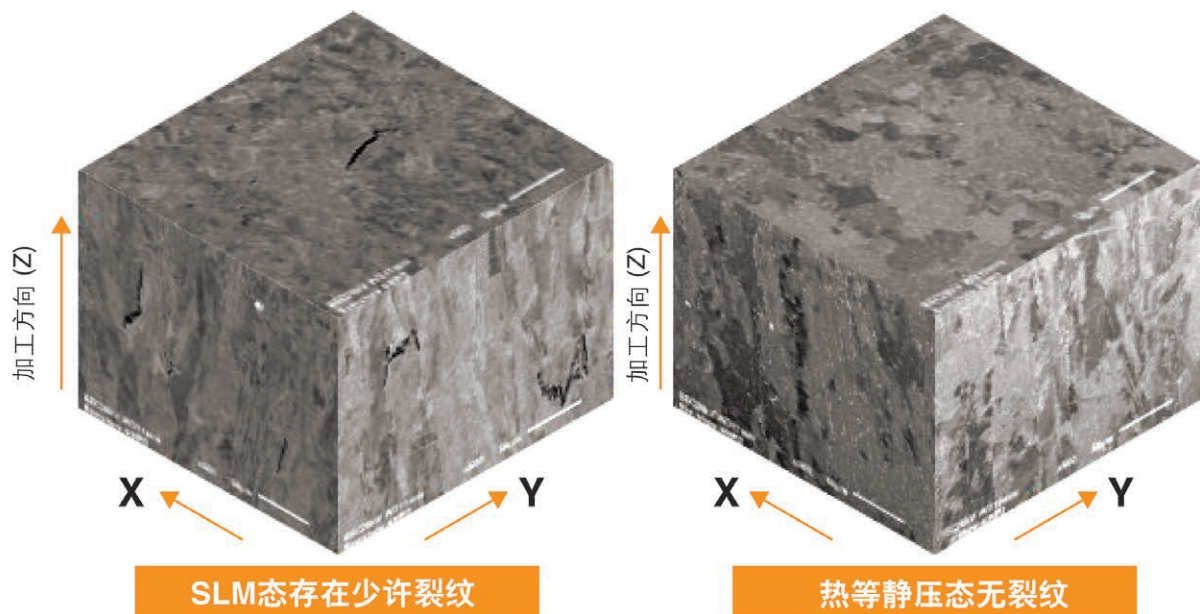


图10 — SLM态镍基合金中形成的柱状晶粒（左），从图中可以看出细长晶粒沿加工方向排列，而且跨越多层。此外，还有一些固化裂纹和晶界裂纹。序后热处理可以闭合这类孔隙，而且还可以修改微观结构以产生更多的等轴晶粒，从而形成更标准的材料属性。

## 最优激光工艺

因此，我们决定计算出一种理想的速度和功率组合，以形成深度、宽度和持续时间最优的熔池。也就是说，以最优能量加工零件。找到正确的组合，即可降低孔隙率，形成满足材料特性和生产力要求的微观结构。

一种办法是计算“能量密度”，即施加到单位体积材料上的能量。能量密度恒定时，激光功率和扫描速度成反比。因此，在P-V坐标系中，能量密度轮廓线从原点辐射，同时密度与轮廓线的梯度相关。

针对所选择的材料和层厚，存在一个最佳能量密度，这个密度能够实现最高的加工效率和最准确的微观结构。在选择工艺参数时，我们希望在增材制造设备的激光和聚焦光学组件的能力范围内，尽可能远离边界避免冒险进入球形化区间。从而实现最优的材料特性和生产力。在图11中，“X”即为最佳加工点。

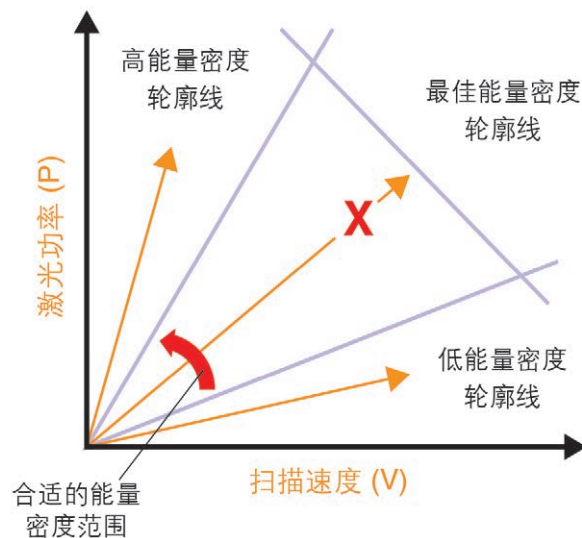


图11 — X即为这种材料的最佳加工点。

## 扫描线距离

上文的分析中缺少一个关键因素：扫描线距离。上文的示意图中假定扫描线距离是固定的，因此能量密度仅由激光功率和扫描速度决定。

事实上，扫描线距离可以独立于功率和速度而变化，而且还会影响能量密度。因此，通过改变扫描线距离可以沿多条P-V轮廓线保持相同的能量密度。因而可以通过许多不同的方式施加相同的能量到加工层上。

下图中橙色箭头所示的所有三个轮廓线具有相同的能量密度。例如，如果采用较高的功率/速度比（即我们选择更接近深孔形成区的较陡的轮廓线），则可以通过增加扫描线间距来保持能量密度恒定。这样是可行的，因为如果用穿透性更强的激光束形成更宽、更深的熔池，那么可以在确保所有扫描线彼此相融的前提下，增加扫描线之间的间距。

$$\text{能量密度} = \frac{\text{激光功率}}{\text{扫描速度} * \text{扫描线距离} * \text{层厚}}$$

图12 — 能量密度公式。

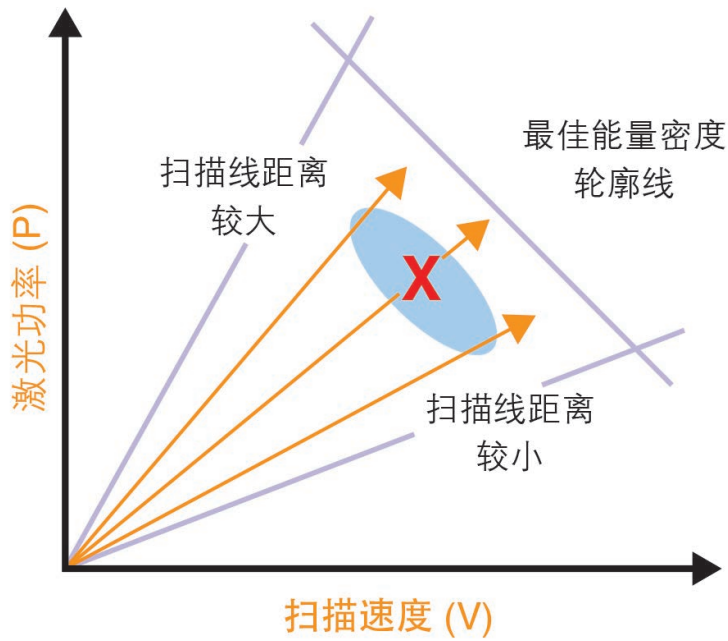


图13 — 扫描线距离对熔融工艺结果的影响。

但是，由于上文上述的原因，这样做会导致材料特性变差。越靠近深孔形成区，工艺安全系数就越低，因此这些参数可能不适用于某些几何形状。所以必须选择一个能够达到中央P-V轮廓线的扫描线距离，该轮廓线应远离熔融不足和深孔形成区间。

上图中蓝色区域中的参数组合应能实现合格的工艺结果，但是“X”是最理想的加工点。由于来自激光光束的大部分能量都被吸收在熔融轨道中心的激光光斑内，因此，一般来说，与光斑尺寸（或熔融轨道宽度的一半左右）最相近的扫描线距离的加工效率最优。



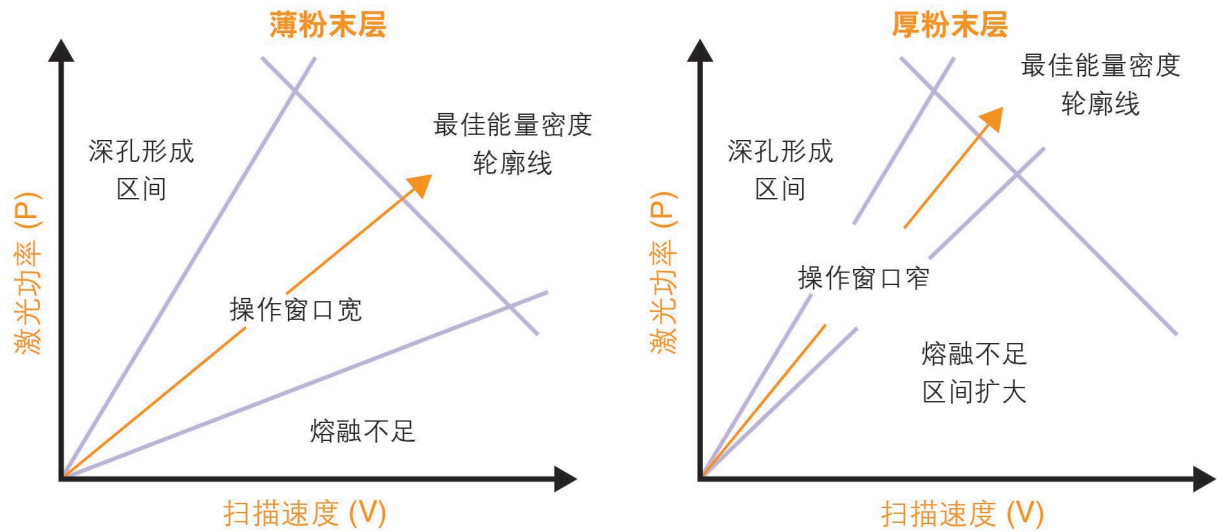


图14 — 层厚与操作窗口大小成反比

## 层厚

在上文讨论的情形中，层厚是固定的。如果改变层厚又会如何？如果对表面光洁度要求不高，是否可以增加层厚以提高加工效率？

在一定程度上，答案是肯定的。显然，粉末层越厚就要求激光能量渗透更深，才能确保与下方的金属层完全融合。为了获得最优的能量输入以完全熔融材料，随着层厚增加，必须相应增加每层的能量输入。如此一来，能量密度轮廓线变得更加陡峭。

层厚增加会扩大图14上的“熔融不足”区间，从而缩小其与深孔形成区间之间的间隙。深孔形成区间本身可能不会随层厚出现很大变化，因为这种效应由激光光斑的强度和速度以及激光光斑与材料的相互作用方式控制。

因而，操作窗口逐渐变小，最终在某个层厚上，在保持熔池稳定并且与下方的金属层充分融合的同时，无法渗透足够的深度。

能够提供合理的操作窗口的可行层厚因材料而异，但是一般来说，当激光功率达到500 W，光斑直径为70至100微米时，可行层厚范围为30至90微米。

针对较厚的粉末层，可以相应地增加光斑尺寸，以降低较高激光功率下的光斑强度。然而，这种变化会导致保真度损失，熔池尺寸和飞溅物增加，并且还可能影响微观结构和材料特性。

### 几何形状对余留热量的影响

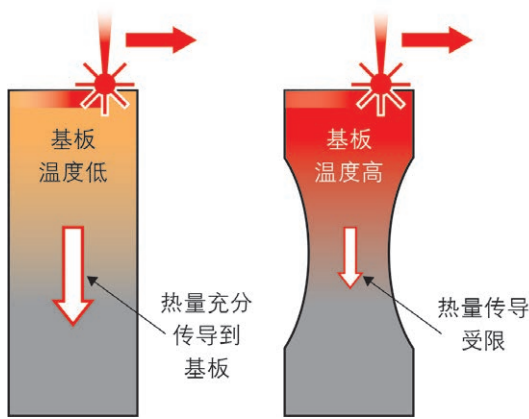


图15a — 几何形状对余留热量的影响。

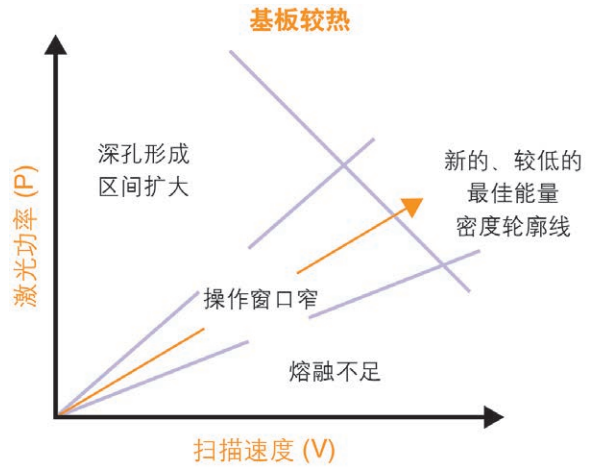


图15b — 余留热量使操作窗口变窄。

## 为什么需要安全系数？

我们需要较宽的操作窗口的原因是，加工件上所有区域的热条件并不总是恒定的。每增加一层，热量就会向下传导到下方已加工的金属层中。热量散发情况取决于零件的局部几何形状和材料特性。

如果与下方的基板之间有良好的导热连接，那么热量将有效消散。相比之下，如果零件的几何形状包含薄壁，或者如果在较薄的部分上方直接加工实体部分，那么热量将无法顺利向下传导，导致较多的热量余留在零件最顶层附近。这种效应在导热率相对较低的材料（例如Ti6Al4V）中最为明显。参见图15a。

在这种条件下，基板和粉末已被预热，因此只需要较少的能量输入即可产生相同的熔融效果。这种预热对熔融过程的影响是，扩大了深孔形成区间，导致以更低的功率便会形成深孔孔隙。新的最佳能量密度轮廓线比原来的更低，而且操作窗口更窄。参见图15b。

一种可能的补救措施是，使用模拟技术来确定零件可能过热的区域，并减少在这些区域中输入的激光能量，以抵消这种预热效应。

将这一点与上文所说的层厚因素相结合得出的结论是：采用厚粉末层加工薄壁零件的难度很大。

## 标称和特定参数集

上文中，我们关注的重点是计算每种材料的理想实体工艺参数，从而尽最大可能提高金属零件的加工效率。但是，一个有效的参数集需要不只一种设置，因为零件的不同区域存在不同的熔融和冷却条件。为制成满足最终用途的零件，必须在实体参数中补充适合所加工的各种几何形状的专门设置。

每个零件都由许多实体部分和不同方向的表面组成。实体部分的加工要求是密度高、加工速度快、材料特性优。然而，边界部分的优先考虑因素有所不同。这部分最重视的可能是表面光洁度，以避免隐藏表面缺陷，进而导致零件在序后处理期间发生损坏。下表面一般冷却较慢，因为它的下方没有固体基板，因此在这个区域，需要尽量避免变形和浮渣。

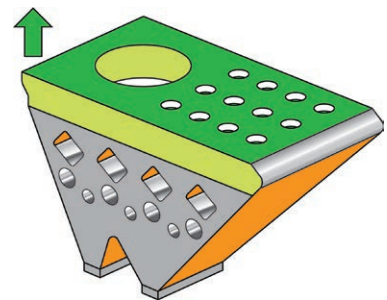


图16 — 实体边界，上表面和下表面通常需要与零件实体不同的参数。

我们通常在这些区域运用截然不同的参数，因此，即使标称参数集中也包含针对零件不同区域的多种设置和扫描策略。为确保零件的所有区域都达到最优质量，需要开发更多应用特定参数。

## 总结

工艺参数选择对于增材制造加工成功至关重要，因为它决定了材料将如何熔融和固化以形成我们需要的零件。由于每种合金粉末都以不同的方式吸收激光能量、传递热量、流动并固化，因此必须针对待熔合金的具体特性来选择工艺参数。

必须在增材制造设备的能力范围内确定一个宽操作窗口，并在窗口中间找到最优加工点，而且这个点的安全余量应能够适应各种局部熔融条件。

即使这样，某些几何形状可能仍需要修改参数方可适应余留热量的变化。

边界和下表面区域也可能需要不同的工艺参数和扫描策略，才能满足表面光洁度要求。

## 后续步骤

欢迎访问雷尼绍增材制造指南专栏，这是为增材制造用户以及整个工程行业提供的信息中心，包含视频、案例分析、专题文章、行业新闻和评论文章等等。您可以在雷尼绍网站上免费获取该指南 —

[www.renishaw.com.cn/amguide](http://www.renishaw.com.cn/amguide)

## 参考文献

[1] Robert M Suter, He Liu and AD (Tony) Rollett, Towards optimal processing of additive manufactured metals for high strain rate properties (通过金属增材制造零件的优化加工实现高应变率特性), SSAP Chicago, April 12-13, 2017

[2] J.C. Heigel, B.M. Lane, Measurement of the melt pool length during single scan tracks in a commercial laser powder bed fusion process (商用激光粉末床熔融工艺中单道扫描的熔池长度测量结果), SME 2017 12th International Manufacturing Science and Engineering Conference, June 4-8, 2017, Los Angeles, USA (MSEC2017- 2942)

## 作者简介

### Marc Saunders, 增材制造应用总监

Marc Saunders先生在高科技制造领域有超过25年的丰富经验。Saunders先生在雷尼绍先后担任了多个职位，在开发公司屡获殊荣的RAMTIC自动化加工平台中做出了关键贡献，还成功为航空航天领域客户提供交钥匙测量解决方案。

Marc现在是雷尼绍全球增材制造解决方案中心网络的负责人，致力于帮助考虑将增材制造工艺纳入生产流程中的客户在采购新设备之前获得实际操作体验。

[www.renishaw.com.cn/additive](http://www.renishaw.com.cn/additive)

