雷尼绍（上海）贸易有限公司
中国上海市静安区江场三路288号
18幢楼1楼
200436

T +86 21 6180 6416
F +86 21 6180 6418
E shanghai@renishaw.com
www.renishaw.com.cn

雷尼绍 RENISHAW apply innovation™

增材制造设计的基本要素 — 快速高效打印零件



增材制造 (AM) 具有极高的自由度，能够创造具有自由形状和复杂特征的零件，而采用传统方式制造这些设计却是非常不切实际，甚至根本不可能实现的。

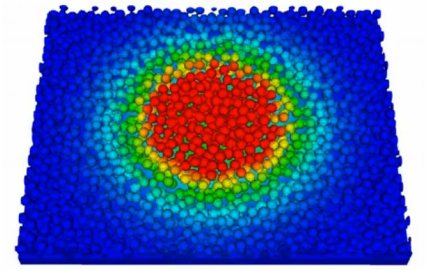
所以，增材制造允许我们随心所欲地自由设计，对吗？其实，并不是这样。

与任何其他制造工艺一样，各种增材制造技术也各有其优势和局限性。在本文中，我们将探讨激光熔融金属零件的一些关键的增材制造设计 (DfAM) 考虑因素，包括特征尺寸、表面粗糙度、悬伸特征、最大程度减少支撑和避免零件变形。

特征尺寸

机械加工工艺能够生产的细节特征的尺寸受切削刀具选择的限制。切削刀具的尺寸决定了零件上的孔和槽的最小尺寸。

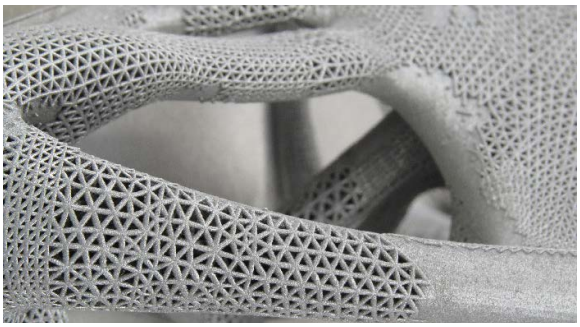
增材制造也适用类似的规则，只是这种工艺更关注打印出来的实体元素的尺寸，而不是间隙，而且刀具尺寸为激光的光斑尺寸。光斑加热粉末形成熔池，当激光能量移开后，熔池冷却形成固体结构。通过光斑尺寸以及激光功率和激光调制控制熔池尺寸，进而控制所加工的结构的尺寸。



上图显示了激光能量如何加热光斑下的粉末颗粒，以及热量如何传递到周围的粉末中。必须将足够的能量施加到材料中，以熔融中心区域中的粉末，形成完全致密的零件。但是这样做的结果是，部分热量会传递到激光光斑范围之外。而且，这种加热效应也会发生在粉末床下方。

由于这种效应，最小可生产特征尺寸通常略大于光斑尺寸。激光光斑之外的粉末烧结量取决于粉末的导热率和所施加的激光能量。

对于诸如网状结构之类的精细结构，使用70 µm激光光斑可以加工直径低至140 µm的支撑柱，还能够实现低至200 µm的壁厚。

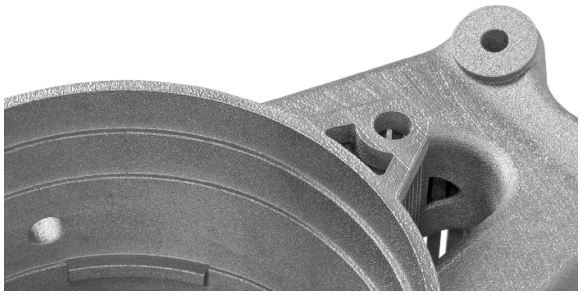


表面粗糙度

聚焦激光束的高温将粉末熔融成液态，然后冷却后形成致密的固体。从熔池的中心向外，温度逐渐下降，直到在某个位置，粉末颗粒发生软化但不会液化。

这些部分烧结的粉末颗粒中有一些会被熔融的金属吸附，并牢固地附着在零件表面上。而其他距离热源稍远的粉末颗粒在冷却后不会与周围的粉末颗粒附着。在这种逐个颗粒熔融的过程中，部分粉末颗粒会附着在零件上，而其他颗粒则不会，从而形成增材制造零件的特色纹理表面。

由于部分热量会向下传递到下方的金属层中，因此在加工下一层时可能会发生部分重熔，从而在某种程度上降低这种效应。这种逐层熔化和冷却效应使得零件表面在层与层交汇处形成相似的条纹。



© 2017-2020 Renishaw plc。版权所有。

因此，最终的表面粗糙度很大程度上取决于激光功率和激光调制、典型粉末粒度和层厚。采用较薄的加工层可改善表面粗糙度，但是代价是加工时间延长。在激光熔融工艺中，在机器上（不进行任何后续序后处理）使用一般粉末成分可以形成的表面粗糙度 (Ra) 通常在5至10 µm的范围内。

悬伸结构

在粉末床加工工艺中，由于形状是一层一层构建起来的，因此层与层之间的连接方式非常重要。每一层熔融时都需要下面一层来提供物理支撑和散热路径。

当激光熔融粉末层时，如果粉末层下方为固体金属，则热量会从熔池传递至下方结构，这样会重熔部分固体金属并形成坚固的焊材。当激光源移开后，熔池会快速凝固，因为热量已经有效传递出去。

如果零件具有悬伸部分，那么熔池下方至少有一部分区域会是未熔粉末。粉末的密度低于固体金属，因此无支撑的新熔融薄金属层会下垂。未熔粉末的导热性也远远低于固体金属，所以来自熔池的热量会保留更长时间，导致周围更多粉末烧结。因此，悬伸结构的表面可能比较粗糙。

上例中通过构建金属层来创建异形内部通道。绿色层的加工效果良好，黄色层虽然可以加工但是表面粗糙度可能较差，而红色层则会变形。随着我们移动到通道的左侧弯曲边缘，并且悬伸角度增大，加工层将逐渐支撑不足，最终在水平悬伸处加工层下垂并且可能加工失败。

我们的经验法则是，悬伸结构与垂直方向之间的角度应避免大于45度，最好为30度。如果大于此角度，则需要使用支撑。

横向孔

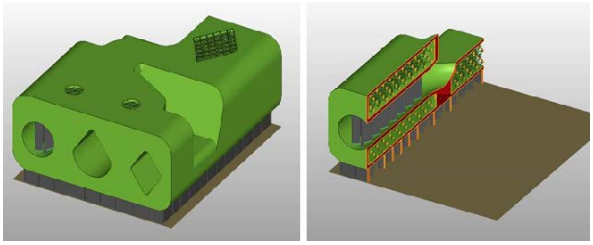
增材制造零件侧面的孔会产生悬伸结构。圆孔的变形度主要取决于孔的直径，而且不同的材料也会有所不同。一般来说，直径小于10毫米的圆孔可以自行支撑，不会发生肉眼可见的变形。

最大程度减少支撑

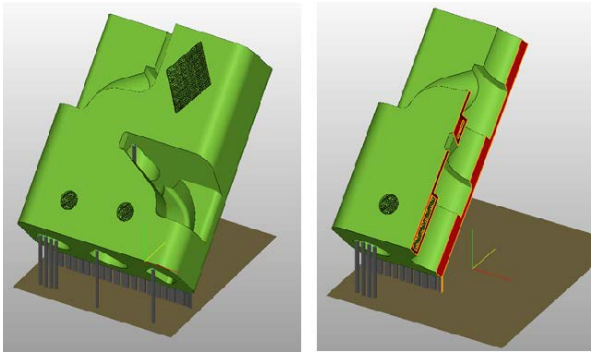
解决悬伸结构问题的一种方法是为悬伸特征使用支撑。但是，支撑实际上是一种浪费，必须在加工完成后去除：支撑可以帮助增材制造过程成功，但会进一步增加复杂性和成本。

因此，增材制造设计流程的一个关键部分是评估如何使用最少的支撑加工零件。我们可以通过倾斜零件以及修改孔、槽和通道等悬伸特征的设计来消除悬伸结构。

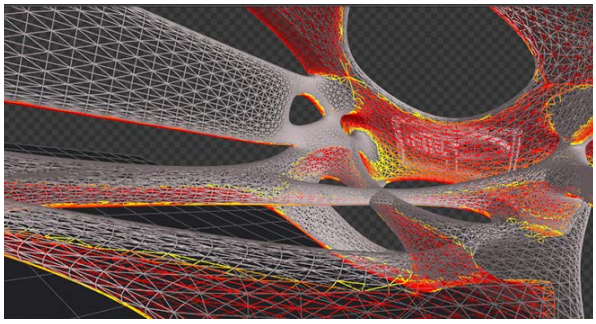
我们习惯于设计圆孔，因为圆孔最容易减材制造。在圆度至关重要的情况下，最好调整圆孔的方向使其轴线垂直向上，从而避免悬伸。如果圆孔必须设计在零件的侧面，则应考虑是否必需将其制成圆形，或者是否可以修改使其更容易加工，例如改为“泪滴”形或菱形。在下面的示例中，圆形的横向孔需要使用内部支撑，而泪滴形和菱形孔不需要任何支撑。



另一种避免支撑的方法是调整零件摆放，尽管这可能会增加额外的加工层和加工时间。在下图中，我们将零件倾斜，使圆柱孔的内部不需要使用支撑，仅零件底端表面的那些区域需要使用支撑。



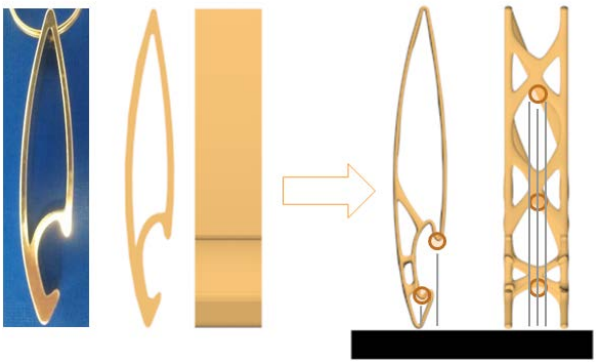
零件设计和加工摆放的这种优化可能很棘手，通过重新定向消除零件在一个区域中的支撑会导致在其他位置需要使用支撑。雷尼绍的新型QuantAM加工文件处理软件可即时查看无支撑的零件区域，并且能够帮助部署支撑。



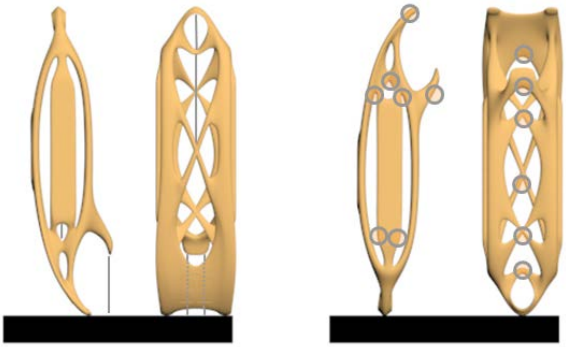
© 2017-2020 Renishaw plc。版权所有。

案例分析 — 消除支撑

我们来看一个处理悬伸结构的例子。雷尼绍的增材制造啤酒开瓶器最初设计为下方左图所示的流畅设计。我们针对增材制造进行优化的第一个尝试是，创建下方右图所示的较为复杂的结构以减轻重量。这导致出现多个悬伸结构（橙色圆圈），需要额外的支撑材料（灰色）。



因此，我们进行了再次尝试，增加了一些结构，以最大程度减少所需的支撑（左下图）。然后，将零件倒转之后（右下图），我们设计出了具有自行支撑悬伸结构（灰色圆圈）的加工件，只需一个很小的支撑即可将开瓶器连接到加工托盘上。



这样，加工件就可以连接到加工托盘上。太棒了！



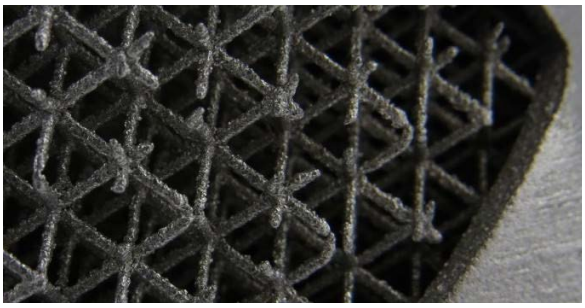
残留应力和变形

增材制造实质上是一种焊接工艺，其光斑直径比传统焊接工艺要小，因此能量密度很高。这会导致较大的横截面中或横截面变化大的零件中产生应力，而应力可能会导致零件从边缘处开裂，如下所示。

这种应力会导致发生翘曲，在极端情况下，会导致零件从支撑结合部拉脱，甚至发生断裂。如果需要加工厚截面，明智的做法是选择一个较厚的加工托盘，以抵抗这种弯曲力。

通常，最好避免在增材制造零件中设计非常厚的截面，尤其是当使用钛等材料时，因为其熔融温度和残留应力会很高。如可能，应保持截面厚度薄且一致，从而使零件某一区域的应力不会令其余区域变形。如果必须使用大块材料，请考虑采用网状结构，以减少应力、重量、材料成本和加工时间。

网状结构也可用于加固非常薄的薄壁结构，否则薄壁可能会由于冷却时产生的应力而发生翘曲。



总结

增材制造在设计各式各样的零件方面具有极高的自由度，但是我们需要了解这种工艺的某些特性和局限性，以设计出能够加工成功的零件。

上文所述的增材制造设计规则在实践中并不繁琐，而且实际上有助于我们探索如何制造重量更轻、加工时间更短、成本效益更高的零件。

现代的设计和加工文件处理软件可极大地帮助您找到最优的设计、摆放和支撑策略，从而经济节约地制成质量稳定的零件。

© 2017-2020 Renishaw plc。版权所有。



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

© 2017-2020 Renishaw plc。版权所有。

扫描关注雷尼绍官方微信