



碳纤维 3D 打印

入门指南

碳纤维的兴起

尽管碳纤维 3D 打印已经问世十多年,但它最近几年才快速兴起。目前,市面上现有的许多 3D 打印机制造商都在争先恐后地宣传“碳纤维 3D 打印”概念,但事实上,各种碳纤维之间也存在差别。

本白皮书将为您介绍 3D 打印领域中碳纤维的基础知识,文中将定义不同的类型,研究面临的挑战、优点、实现注意事项等。在碳纤维打印领域,我们将深入研究 Markforged 的碳纤维增强 (Carbon Fiber Reinforcement, CFR) 的优点。

碳纤维基础知识

什么是碳纤维？

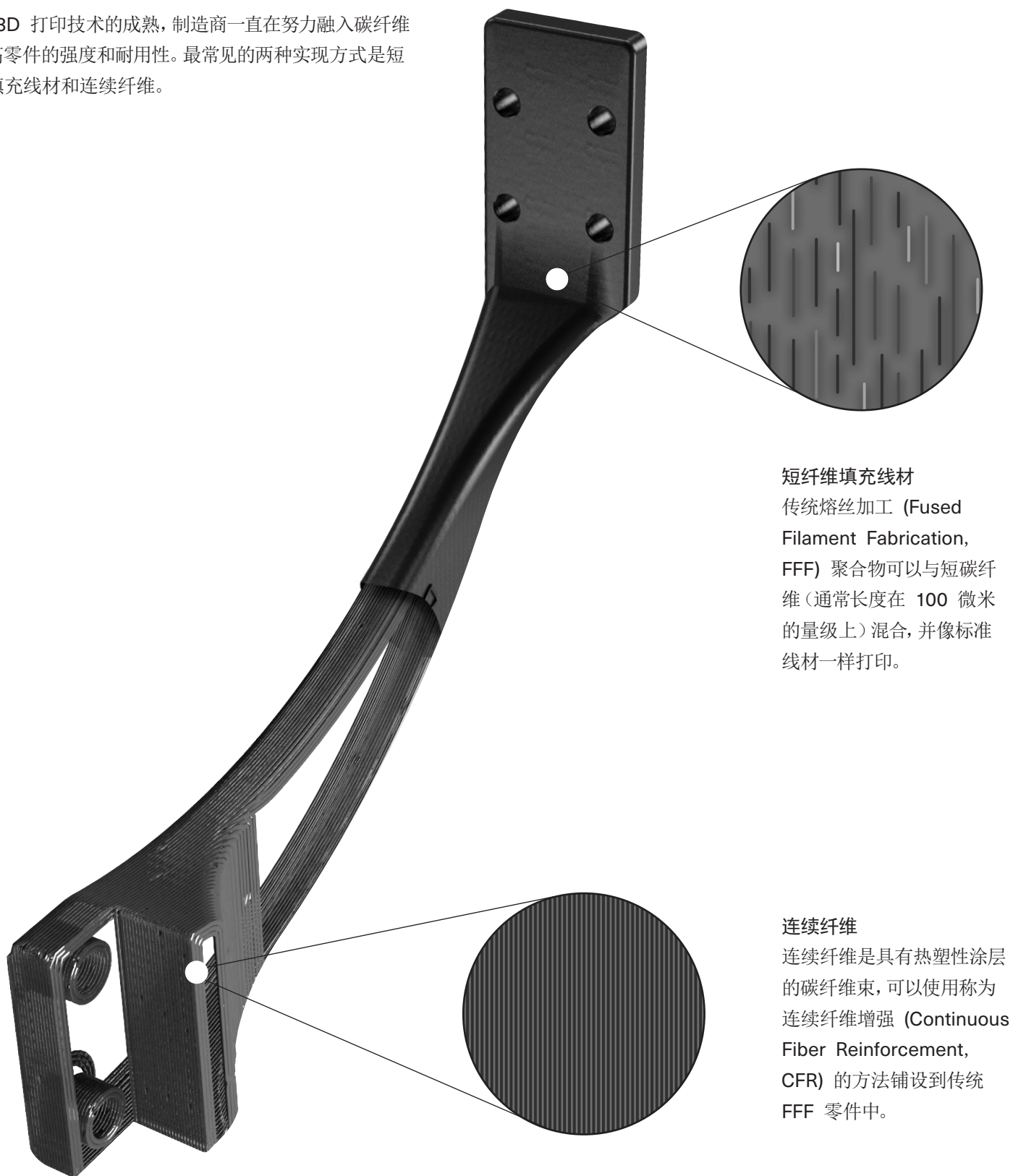
碳纤维由沿着细长晶体结构方向排列的碳原子组成，直径为 5-10 微米。这些纤维既可以单独使用，也可以将数千根碳纤维单丝捆束起来组成纤维束加以使用。在现代制造业中，碳纤维通常会与其他材料结合构成复合材料来使用。在与热塑性或热固性树脂基体相结合时，碳纤维束可以采用多种形式用于工程应用。最常见的应用是，将它们缠绕在心轴上成管状，将它们拉模以挤压成型，或者将它们编织成带状物和织物。上述碳纤维组合方式可以产生超高强度的自定义的几何形状，广泛用于航空航天、汽车、军事和其他行业。

碳纤维组合后可增强机械性能以及耐热和耐化学腐蚀特性，使其成为高级制造的理想选择。碳纤维具有很强的刚性和抗拉伸强度，而相对密度却远低于钢和铝。碳纤维的强度重量比极高，因此被广泛用于航空航天和汽车行业。



3D 打印中的碳纤维

随着 3D 打印技术的成熟，制造商一直在努力融入碳纤维以提高零件的强度和耐用性。最常见的两种实现方式是短纤维填充线材和连续纤维。



短纤维填充线材

传统熔丝加工 (Fused Filament Fabrication, FFF) 聚合物可以与短碳纤维 (通常长度在 100 微米的量级上) 混合, 并像标准线材一样打印。

连续纤维

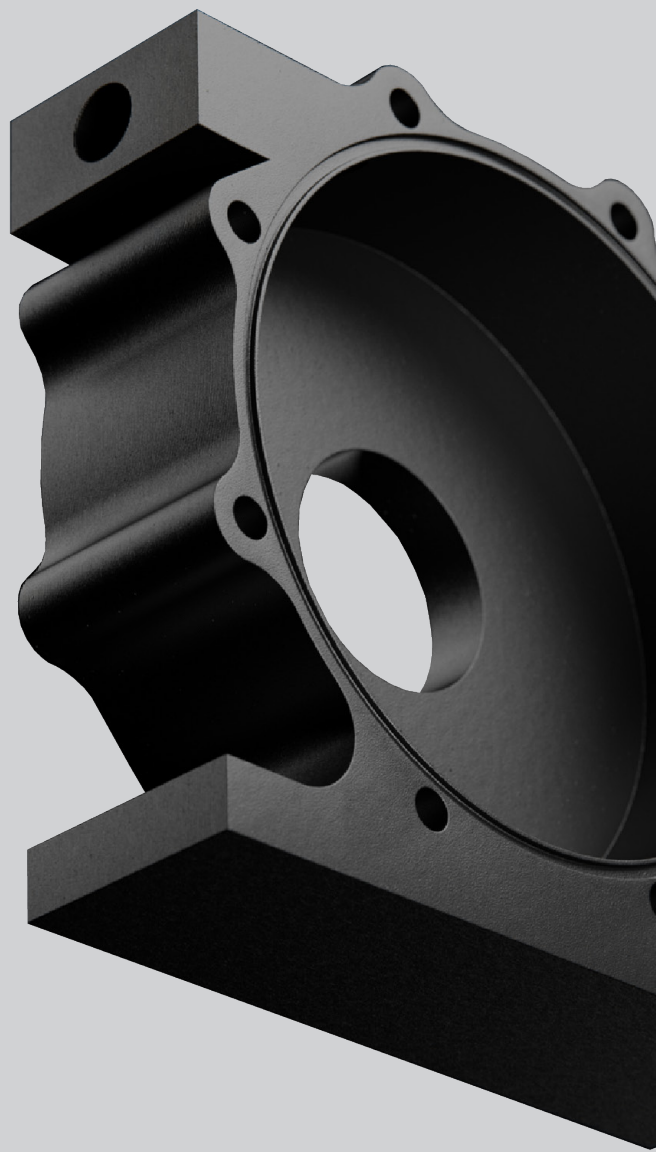
连续纤维是具有热塑性涂层的碳纤维束, 可以使用称为连续纤维增强 (Continuous Fiber Reinforcement, CFR) 的方法铺设到传统 FFF 零件中。

短纤维填充 线材

背景知识

短纤维填料（例如玻璃纤维和碳纤维）在注塑成型行业中已有几十年的使用历史，用于改善热塑性材料的性能。为了制造这些填充线材，制造商将聚合物原料与填充材料混合，制成粒料。这些粒料送入挤出线中，进一步混合、连接并拉伸成线材。然后，将线材绕到线轴上并投入使用。在 3D 打印行业中，此工艺最常见的应用是使用短碳纤维填充线材，以尼龙或 ABS 塑料作为基材。

务必需要注意的是，并非所有填料都是用于增强机械性能的纤维，实际上，有一些填料是用于改善流动性、外形美观甚至是降低成本。





短碳纤维填充线材通常由均匀分布的碳纤维组成，其重量仅占 5% 至 35%。这些纤维是从纤维束铣削或切削而成的短纤维，其尺寸为直径 5-10 微米，长度 50-250 微米。

在线材生产以及打印过程中，材料挤出工艺的流动性使得纤维填充料的方向与打印的方向一致。这意味着要提高抗拉强度和弯曲强度，打印方向最好与零件的外壳方向一致。

主要优点

+ 强度/刚度的轻微增长

这直接使零件强度更大、刚性更强。

+ 提升热稳定性

碳纤维的热膨胀系数低，有助于减少打印过程中的翘曲。此外，这还有助于防止打印零件在高温环境下变形的情况。

+ 更高的打印零件精度

机械稳定性和热稳定性均得到提高，这意味着，采用碳纤维填充的零件相比未填充的零件来说，尺寸精度更高。

挑战

短碳纤维具有明显的优势，包括它所占的体积比。这随之带来了一个问题，为什么所有商用 3D 打印线材都没有办法尽可能多地填充碳纤维？原因是碳纤维给材料生产工艺和打印工艺都带来了许多挑战，其中包括：

- **对线材均匀度有不利影响：**当硬质填充材料的数量超过了某个临界点，在打印过程中会导致表面光洁度比较差甚至是质量缺陷。
- **碳纤维填充线材具有易磨损性，**这会导致针对普通非填充 FFF 线材设计的打印机挤出组件快速磨损。这种情况可以通过更强化的零件和日常维护来进行防范，但会增加设备成本。
- **纤维含量过高也会阻碍物料流动，**并会增加喷嘴堵塞的风险，导致必须经过维护之后才能使用机器。

许多线材制造商对这些缺点视而不见，在填充线材中添加尽可能多的短碳纤维。制作出的零件虽然获得了强度，但却牺牲了表面光洁度和机器稳定性。

Markforged 的碳纤维增强 (Carbon Fiber Reinforcement, CFR) 使我们在设计填充线材 Onyx 过程中规避了这些有问题的模式。大多数填充线材制造商都以牺牲可打印性为代价来优化其材料的强度，可我们依旧优化了打印 Onyx 的尺寸精度、表面光滑度和打印机可靠性。这得益于在 CFR 中使用的连续纤维的强度和刚度，我们可以在不牺牲最终零件强度的情况下做到这一点，下文将对此进行介绍。通过这种方法，我们提高了打印件的精度、整体刚性和强度，实现了更美观的表面以及整体更可靠的打印效果。

连续纤维

背景知识

连续碳纤维是采用热塑性涂层的长碳纤维束。然后，使用 CFR 过程将这些纤维束铺设到热塑性 FFF 零件中。在此过程中，通过加热的喷嘴挤出材料，将热塑性涂层热熔合到零件上。在 3D 打印零件的每一层中，纤维可以按照各种 2D 方向放置。

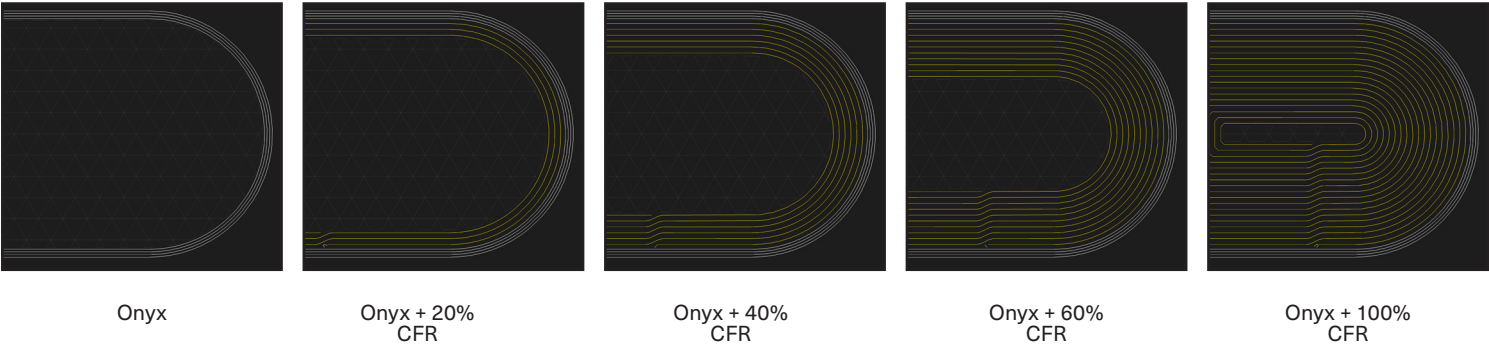
用连续碳纤维增强的零件其强度会提高，可与采用传统复合材料铺陈的方式制造的零件相媲美。在填充线材中，短纤维之间不连续的特性会导致压力通过基体材料传递，从而机械强度的相应提升并不明显。在 CFR 零件中，拉伸和弯曲负荷会施加到长纤维束上，对基体聚合物的负荷将降到最低，从而带来大量机械性能的提升。零件可以采用多种不同的方式进行增强，以针对不同的负荷条件进行优化。

连续纤维增强技术不仅包括碳纤维，还包括连续玻璃纤维、Kevlar® 和高强度高温 Fiberglass 等材料。



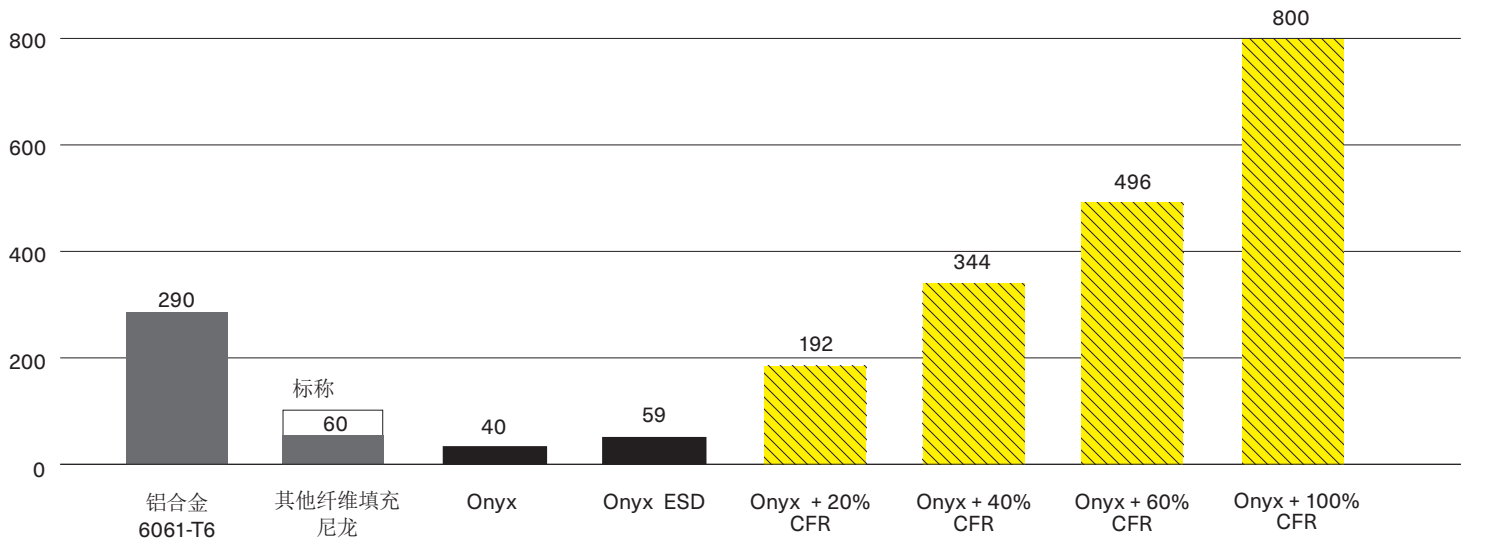
动态连续纤维含量

在使用 CFR 时，用户可以通过两种方式动态控制零件中的纤维量：更改一层中的纤维量；以及指定要增强的层数。此控制使得工程师能够根据所需的强度精确地进行 3D 打印。



拉伸强度 (MPa)

符合 ASTM D638 标准



主要优点

与填充线材所带来的递增式改进不同，连续纤维能够实现零件性能的跨越式改进。连续纤维的优点包括：

- + 能够媲美与铝合金相当的强度，连续碳纤维增强的打印件在实际应用中可以取代机加工的零件。
- + 增强的刚度、抗冲击性、耐热性和耐用性可以通过一系列特定连续纤维增强材料（包括 Kevlar 和 Fiberglass）来实现。
- + 连续纤维补充填充线材。例如，Markforged 在 Onyx 中使用短碳纤维来提高打印零件的精度和表面光滑度，使用连续碳纤维将强度和刚度提高了十倍。

实现连续纤维打印

与纤维填充线材不同，连续纤维由用户通过称为连续纤维增强 (Continuous Fiber Reinforcement, CFR) 的额外工艺来实现。CFR 使得用户可以在其零件中灵活地实现连续纤维：这样，用户可以更好地控制要添加到零件中的碳纤维量。虽然可以随意地使用连续纤维填充打印零件，但只有在根据负载需求对纤维进行战略布置后才能实现最好的效果。经过优化的零件可以使用较少的材料获得相同的预期效果，这样还可以缩短制造时间和减少制造成本。

在考虑使用连续纤维时，可控性是一项关键优势。该可控性可以通过两种关键方法来落实：

1. 确定是否在零件的每一层中放置连续纤维
2. 确定每个需要增强的打印层的增强策略

零件常用的连续纤维技术示例包括：

夹层板

与传统的复合材料铺陈的制造相似，夹层板仅在零件顶部和底部添加连续纤维。在大多数弯曲负荷条件下，零件表面的应力是最高的。夹层板用于抵抗 Z 轴方向的力。

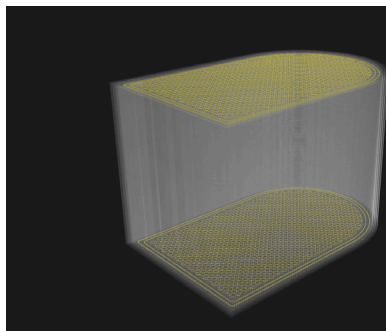
外壳

外壳与夹层板相似，但在每一层的壁内使用连续纤维构成的闭环。为了进行外壳增强，将连续纤维放置在每层的外围，以抵抗沿 XY 平面的力。

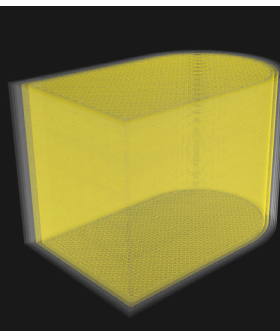
条带

条带采用夹层板的样式，但在零件的一些关键区域增加了连续纤维构成的“条带”。条带可在较高的夹层板中使用，用于分散负荷，从而降低填充物屈曲的风险。

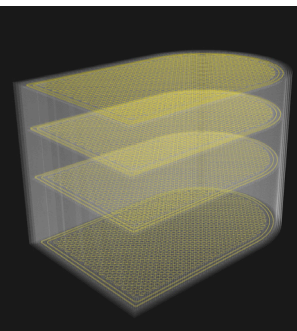
夹层板



外壳



条带



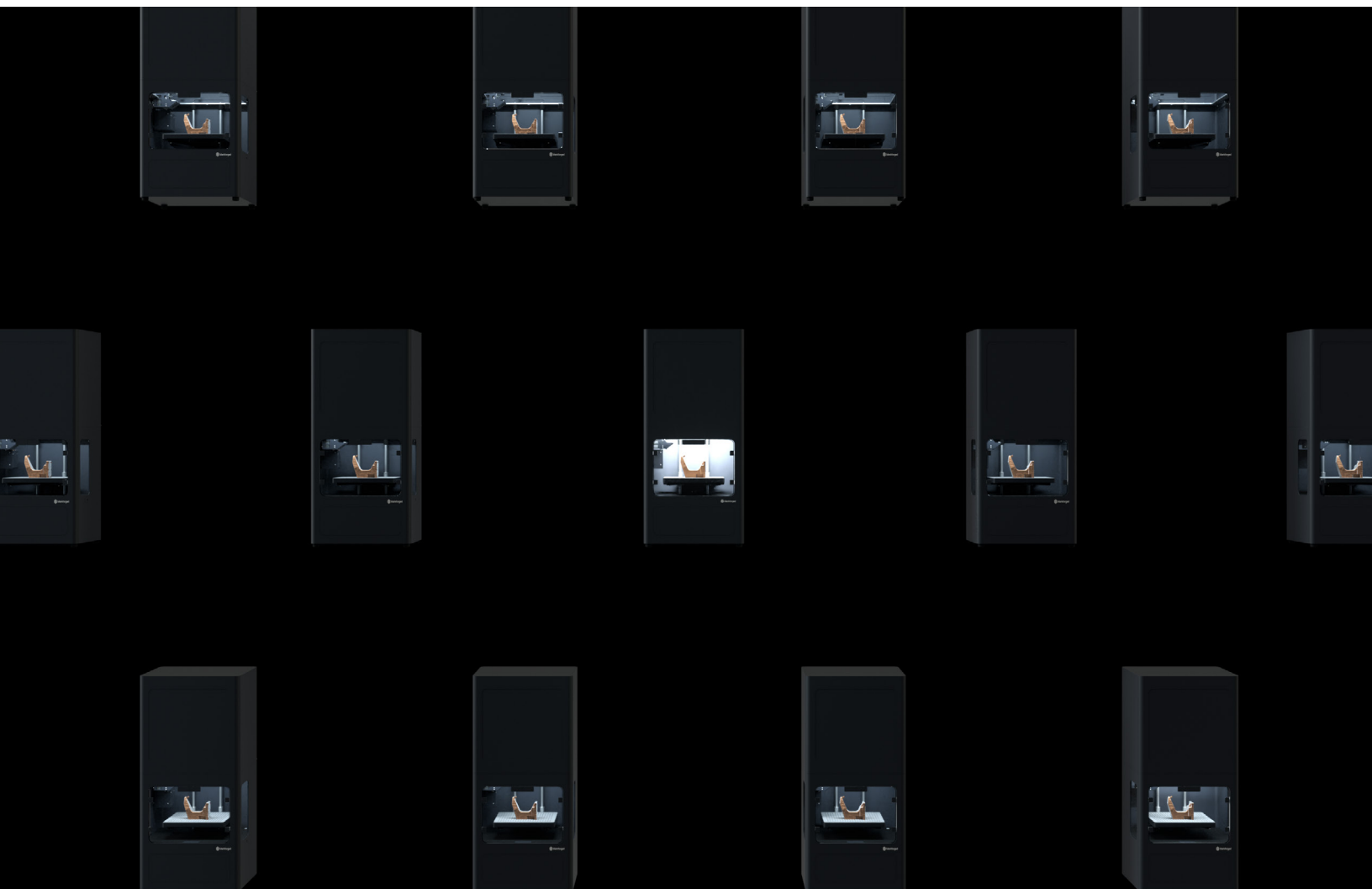
结论

在了解了基础知识、关键定义、优点和注意事项之后，您的组织已经做好了万全的准备，可以开始决定如何投资于合适的碳纤维 3D 打印解决方案。

与连续纤维打印技术领军企业合作，可以帮助您在涉及到 3D 打印时从容应对不断发展的业务需求。连续碳纤维是 **Markforged** 独有的超高强度材料，将其铺设到 **Onyx** 等复合基材上时，可以生产出强度与 **6061-T6** 铝合金相媲美的零件。它具有极高刚度和超高强度，可以采用 **Markforged 3D** 打印机自动铺设成各种几何形状。

Markforged 精心打造的 **The Digital Forge** 是面向现代制造商的简便易用的增材制造平台，它将软件敏捷开发的强大威力和快捷速度融入工业制造。它由在统一平台上无缝协作的硬件、软件 and 材料组成，为特定用途构建，旨在集成到您现有的制造生态系统中，消除设计与功能性零件之间的障碍。

采用 **The Digital Forge** 的组织可以直接获得的益处就是大幅节省制造零件所需的时间和资金。采用该平台的程度越高，您的整个运营也会变得越敏捷越高效，进而让您的组织获得竞争优势。



Markforged 利用 3D 金属和碳纤维打印机转变了制造工艺，能够生产出足够坚韧的零件以用于工厂车间。全世界的工程师、设计师和制造业专业人士都依赖 **Markforged** 金属和复合打印机来生产工装、夹具、功能性原型和高价值的最终用途产品。**Markforged** 成立于 2013 年，总部位于马萨诸塞州沃特敦，在全球拥有约 300 名员工，战略和风险资本达 1.37 亿美元。近期，**Markforged** 被福布斯评为“下一个十亿美元初创企业”，并在 2019 年跻身德勤高科技高成长 500 强，在福布斯评出的发展最快的美国硬件公司中位列第二。