

增材制造技术国内外应用与发展趋势

顾波^{1, 2}

1. 中国光学学会激光加工专委会 北京 100081

2. 美国玻色光子公司 北京 100081

摘要: 全面介绍7大类3D打印技术和增材制造工艺, 重点介绍采用激光作为热源的金属增材制造技术, 即激光粉末床熔合 (LPBF) 和激光定向能量沉积 (LDED)。综述了近几年国内外激光3D打印和增材制造的设备开发和商业化的发展历程。展示了国内外金属激光增材制造应用的状况, 特别是在航空航天、汽车制造、生物医药、模具制造、家电, 以及珠宝首饰、文化创意、创新教育等领域的应用成果和未来趋势。阐述了目前增材制造技术存在的困难和面临的挑战。总结了增材制造的最新发展, 包括采用绿光或紫外激光打印铜、铝、金、银、铂和铱等高反射材料, 超快激光打印高密度、耐火、难熔金属合金, 以及3D打印玻璃和陶瓷等。展望未来几年的发展趋势, 特别是激光增材制造在空间系统和卫星制造中的应用, 以及在太空中进行激光增材制造的前景。

关键词: 3D打印; 增材制造; 技术与设备应用; 发展趋势

1 序言

3D打印技术和增材制造技术 (Additive Manufacturing, AM) 一直在全球范围内飞速发展, 并获得了重要的商业应用。这是一种具有颠覆性的制造方法, 它将彻底改变工业革命以来形成的生产方式和生活方式, 彻底改变物体和复杂系统的制造或组装方式。作为战略性新兴产业, 受到世界上多数国家的高度重视, 并积极推广。2012年, 美国总统奥巴马发表国情咨文, 大力支持3D打印技术的发展, 并将其命名为增材制造, 成为世界科技行业的热点。

增材制造技术是朝着“物质数字化”和“逐层构建方法”迈出的重要一步, 这两种方法共同打开了设计空间——材料类型和相位可以根据需要变化, 小 (纳米/微型) 设备可以根据需要选择性地插入, 实现复杂形状, 并与传感器集成在一起。发展目标的最高愿景, 即三维制造的产品不仅具有必要的复杂形状, 还包括“感知”所处环境、收集能量和传达其状态的特性^[1]。

本文将重点介绍3D打印技术和增材制造工艺,

以及金属激光增材制造的技术与设备应用, 阐述目前增材制造技术在国内外面临的挑战, 总结近几年来增材制造的最新发展, 展望未来几年的发展趋势。

2 3D打印和增材制造工艺

3D打印也称为增材制造, 是指在计算机程序控制下连续形成材料层以创建物理对象而生成3D物体的过程。3D文件源通常被分成几层, 每一层生成一组计算机控制的指令。3D打印和增材制造技术的要素就是在整个3D产品中按顺序逐层进行材料添加或连接。3D打印技术可以分为两大类: 直接3D打印和间接3D打印。主要区别在于设计是直接由3D打印 (直接) 制成, 或者在创建模型的过程中使用了3D打印 (间接)。通过3D打印工艺几乎可以制造任何形态或几何形状的物体。它们通常使用来自3D模型或其他电子数据源的数字模型数据生成, 例如立体光刻 (STL) 文件, 这是3D打印机可以读取的最常见的文件类型之一。

增材制造的发明可以追溯到20世纪80年代, 美国、日本和法国等科技人员进行了相关研究。3D打

印的第一个专利是 1984 年由 3D Systems Corporation 的 赫尔 (Chuck Hull) 创造的^[2]。赫尔将 3D 打印过程定义为通过创建要形成对象的横截面图案来生成 3D 对象的系统。他的发明包括一个立体光刻制造系统, 其中材料层是通过用紫外光激光固化光聚合物来添加的。立体光刻到现在仍然是一种非常流行的 3D 打印制造技术。然而, 21 世纪 10 年代, 大多数 3D 打印机使用的技术, 尤其是业余爱好者和面向消费者的产品, 是熔融长丝制造 (Fused Filament Fabrication, FFF), 也称为材料挤压 (Material Extrusion, ME) 或 Stratasys 公司专有的熔融沉积建模 (Fused Deposition Modeling, FDM)。FDM 的专利于 1989 年由 Scott Crump 在与妻子 Lisa Crump 创办 Stratasys 公司之前获得。金属的 3D 打印是在 20 世纪 90 年代随着激光熔化和烧结技术的发明而出现。选择性激光烧结 (Selective Laser Sintering, SLS) 和选择性激光熔化 (Selective Laser Melting, SLM) 通常归为总称直接金属激光烧结 (Direct Metal Laser Sintering, DMLS)。

3D 打印的应用已经非常广泛, 它涵盖了从塑料、金属到有机材料和食品的众多行业。3D 打印中使用了多种材料, 每一种材料都紧密对应着最终产品的技术要求, 并且通常只适用于某种增材制造技术。

为了说明 3D 打印的巨大潜力, 有必要对最流行的材料有一个基本的了解。首先, 从烧结粉末金属开始, 它用于打印传统制造技术 (如铸造) 中使用的注塑模具, 以及注塑成形和碳纤维叠层。其次, 还有如不锈钢、青铜、钢、金、镍钢、铝和钛等适合 3D 打印的几种金属, 这些金属特别适合制作原型、珠宝和定制物品。此外, 镍钛合金为医疗植入物行业带来了广阔的前景, 它的超弹性和改变形状的能力是两个重要的特征。

种类繁多的塑料为 3D 打印提供了广泛的可能性。一些可应用于 3D 打印的塑料包括丙烯酸树脂、聚酰胺、ABS 塑料、聚氨酯、环氧树脂、尼龙和 PEBA 2301 等。这些塑料提供了大量可以想象的 3D 打印物体, 例如原型、齿轮系统、装饰品或教育模型。此外, 蜡既可用于设计验证、功能测试和精细特征细节, 也可用作光滑表面和模具中的工具。

碳纤维和复合材料是尖端材料, 它们提供了一

种快速生产与金属一样强或更坚固物体的方法, 最常用于自行车和航空工业。石墨烯是碳的同素异形体, 是有史以来最坚固的材料, 它具有创造全新技术的潜力, 部分归功于其高效的导热性和导电性以及近乎透明的外观。

一些更不寻常但可实现 3D 打印的材料, 包括干细胞、纸、混凝土、食物和纱线。难以想象, 干细胞的 3D 打印是 3D 打印技术中的佼佼者, 这将使打印的组织、器官或骨骼植入患者体内成为可能。

纸的 3D 打印为想要在将产品推进到最终工程之前制作逼真的 3D 模型的设计师提供了全色谱。3D 打印巧克力、比萨饼和蛋糕装饰正在食品行业进行推广应用。此外, 广泛的材料使得采用 3D 打印生产纱线成为可能。

2010 年, 美国测试与材料协会 ASTM F42 增材制造小组提出了一套标准^[3], 将增材制造工艺分为 7 类。ISO/ASTM 52900-15 定义了 7 类增材制造工艺: 材料挤出 (Material Extrusion)、光聚合 (Photopolymerization)、粉末床熔合 (Powder Bed Fusion)、材料喷射 (Material Jetting)、黏结剂喷射 (Binder Jetting)、片材层压 (Sheet Lamination) 和定向能量沉积 (Directed Energy Deposition)。

以下分别简要介绍 7 大类增材制造技术。

2.1 光聚合

光聚合是增材技术用来一次一层地构建物体的常用方法。当光聚合物树脂暴露在特定波长的光下时, 会发生化学反应, 使其变成固体。光聚合增材制造技术包括几个不同的打印过程, 但它们都基于相同的基本策略: 把放在大盆 (或罐) 中的液体光聚合物通过热源选择性地固化, 一层一层地构建一个 3D 物理对象, 直到完成, 如图 1 所示。

除了早先基于激光的固化技术外, 还涌现出多

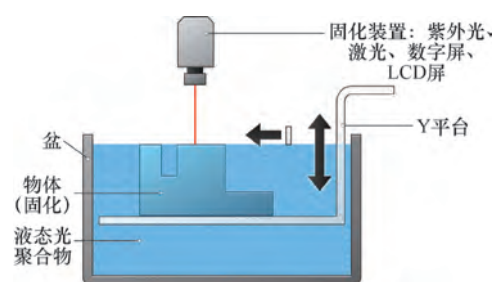


图1 光聚合增材制造示意

种其他技术类型的固化设备。数字光处理投影仪甚至 LCD 屏幕现在是一种流行的光聚合材料方式, 因为其成本低且分辨率非常高。与激光相比, 这两种技术的优势之一是它们能够同时固化整层的树脂, 而激光需要通过绘制来逐步照亮整个表面。

光聚合增材制造技术分为两大类: 它们的相同点是都在打印件的最后一层和树脂槽表面之间的界面处构建零件; 不同点: 一种是自上而下的方法, 先将热源放置在大盆 (VAT) 的下方, 然后 3D 打印平台逐渐提升, 最后打印成的部件是倒置的; 另一种是自下而上的技术, 将热源放置在大盆上方。因此, 3D 打印平台逐渐被浸入盆中。

该技术于 20 世纪 80 年代初由日本和法国研究人员发现并开发, 并于 1984 年由世界上第一家 3D 打印公司 3D Systems Inc. 的联合创始人 Chuck Hull 首次工业化并获得专利。

最流行的大盆光聚合增材制造技术包括以下几项。

(1) 立体光刻 (Stereo Lithography, SLA) 立体光刻也称为光学制造、光固化或树脂印刷, 是世界上最早的 3D 打印技术之一, 由 Charles Hull 在 1984 年发明。它使用激光将液态树脂固化成硬化塑料。在立体光刻制造过程中, 一束集中的紫外线或激光束聚焦在装有液体光敏聚合物的大的表面上。光束或激光被聚焦, 通过交联或降解聚合物来创建所需 3D 打印对象的每一层。SLA 对象具有高分辨力和准确性, 以及清晰的细节和光滑的表面。SLA 用途广泛, 可应用于许多不同的用例, 因为光聚合物树脂配方具有广泛的光学、机械和热性能, 可与标准、工程和工业热塑性塑料相匹配。

(2) 直接光处理 (Direct Light Processing, DLP) 直接光处理 3D 打印是利用数字投影仪屏幕将每个打印层一次闪烁成像到整个打印平台上。直接光处理与 SLA 几乎相同, 不同之处在于它使用数字光投影仪屏幕一次闪烁每一层的单个图像。由于投影仪是一个数字屏幕, 所以每一层的图像都是由正方形像素组成, 从而形成一层被称为体素的小矩形砖块组成的层。直接光处理可以为某些部件实现比 SLA 更快的打印速度, 因为每一层都是一次性曝光, 而不是用激光一点一点绘制出来。

(3) 连续液体界面打印法 (Continuous Liquid

Interface Production, CLIP) 连续液体界面打印法以与 DLP 相同的方式生成对象, 但依赖于构建板在 Z 轴上的连续运动。这会缩短构建时间, 因为在生产每一层后, 打印机不需要停下来将部件与构建板分开。它用树脂罐作为基材, 罐底对紫外线是透明的, 因此被称为窗口。紫外线光束透过窗口照射, 照亮物体的精确横截面。光使树脂固化 (光聚合), 物体上升得足够慢, 以使树脂在物体底部流动并保持接触。树脂下方有透氧膜, 形成死区。这种持久的液体界面可防止树脂附着在窗口上, 这意味着窗口和聚合器之间的光聚合受到抑制。与标准的立体光刻不同, 连续液体界面打印法的 3D 打印过程是连续的, 并且可以比其他商业 3D 打印方法快 100 倍。

(4) 日光聚合物打印 (Daylight Polymer Printing, DPP) 日光聚合物打印过程使用液晶显示器, 而不是使用激光或投影仪来固化聚合物。这种技术也称为液晶显示 3D 打印, 它使用未经修改的 LCD 屏幕和特殊配方的日光聚合物。

Photocentric 公司已经能够通过开发世界上最敏感的日光树脂之一来完成这项工作。

光聚合物树脂有不同的颜色可供选择, 并表现出不同的物理特性, 每一种都对应于特定的用途。树脂种类包括韧性树脂、低残留树脂 (熔模铸造)、透明树脂和柔性聚氨酯树脂。

光聚合打印已成功应用于医学建模, 可以根据计算机扫描数据创建患者各个解剖区域的准确 3D 模型。该技术的高分辨率也使其成为所有类型的原型制作以及大规模生产的理想选择。还原聚合工艺非常适合生产具有精细细节和光滑表面的零件, 这使它们成为珠宝、熔模铸造以及许多牙科和医疗应用的理想选择。打印材料的发展也使得打印低流动注塑模具成为可能。由于光聚合打印的主要限制在于构建尺寸的限制和部件强度、脆性, 因此其不适用于机械零件。

2.2 粉末床熔合

粉末床熔合 (PBF) 增材制造技术使用热源生产固体部件, 该热源在塑料或金属粉末的颗粒之间一次一层地诱导熔合、烧结或熔化。大多数 PBF 技术具有在构建部件时散布和平滑粉末薄层的机制, 从而在构建完成后将最终部件封装在粉末中。最常

见的应用是功能对象、复杂管道（中空设计）和小批量零件生产，它可生产高精确度的产品。这种增材制造技术能够使用热源（主要是激光或电子束）来制造大量几何形状复杂的产品，以逐层熔合粉末颗粒，从而形成固体部件。由于粉末床熔合增材制造技术提供了几种不同的技术和材料，因此提供了极大的设计自由，如图2所示。

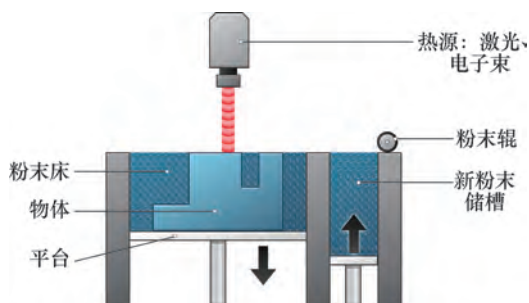


图2 粉末床熔合增材制造示意

PBF技术的主要变化来自不同的能源，例如激光或电子束，以及过程中使用的粉末，例如塑料或金属。基于聚合物的PBF技术允许创新，因为不需要支撑结构，这使得创建具有复杂几何形状的对象变得更加容易。PBF打印的金属和塑料物体通常都坚固且坚硬，其力学性能可与基体材料相媲美，有时甚至更好。有一系列可用的后处理方法可以使对象具有非常光滑的表面质量。出于这个原因，PBF通常用于制造航空航天、汽车、医疗和牙科行业的功能性金属部件。PBF的局限性往往是加工过程中的表面粗糙度和收缩或变形，以及粉末处理和处置带来的挑战。

几种主要的粉末床熔合方法如下。

（1）选择性激光烧结（Selective Laser Sintering, SLS） 选择性激光烧结3D打印技术是工业应用中最常见的增材制造技术，它起源于1980年代后期的美国德克萨斯大学奥斯汀分校。多年来，这项技术取得了显著的进步。基本上，该过程使用激光逐层烧结或聚结粉末材料以形成固体结构。最终产品被包裹在松散的粉末中，然后用刷子和加压空气清洁。SLS3D打印过程中使用的主要材料包括聚酰胺（尼龙）、铝化物、灰色铝粉和聚酰胺的混合物，以及类橡胶材料。尼龙坚固耐用，但具有一定的柔韧性，使其非常适合打印按钮、支架、夹子和弹簧等，设计人员应在起初阶段就考虑薄部件材

料收缩和翘曲的敏感性。与SLA和FDM相比，SLS不需要对象具有支撑结构，这是因为未熔合的粉末在打印过程中支撑着零件。这使得SLS非常适合具有复杂几何形状的对象，包括内部特征、底切和负特征。使用SLS打印生产的零件通常具有出色的机械特性，这意味着它们非常坚固。薄壁物体不能打印，因为有最小1 mm的限制，大型模型中的薄壁冷却后可能会翘曲。

低成本、高生产率和成熟材料的结合使SLS成为功能原型设计工程师的热门选择，并且是有限运行或桥梁制造的注塑成形的一种经济高效的替代方案。

（2）激光粉末床熔合（Laser Powder Bed Fusion, LPBF）和直接金属激光烧结（Direct Metal Laser Sintering, DMLS） 为了制造具有极其复杂结构的高性能金属零件，弗劳恩霍夫激光技术研究所Meiners 研究组和大阪大学Abe 研究组在1996 年首次提出了LPBF 技术的概念。然而，在LPBF技术的早期发展阶段，由于粉末熔合不完全以及熔化后易发生粉末球化，构建部件的密度和强度不足，因此难以实际应用。随着采用高性能光纤激光器和对LPBF工艺的优化，LPBF构建的钛合金、高温合金、钢和铝合金的成形精度、密度和力学性能得到了显著提高，因此LPBF技术逐渐成为医疗、汽车、航空航天等领域的主流商业化增材制造技术之一。

LPBF也称选择性激光熔化（Selective Laser Melting, SLM）。LPBF和DMLS具有相同的技术原理，但DMLS专门用于生产合金金属零件。由于LPBF完全熔化粉末，因此可用于单成分金属如铝等来制造轻质、坚固的备件和原型。而DMLS对粉末进行烧结，将粉末加热到接近熔化温度，直到它发生化学熔化。DMLS是最成熟的金属增材制造工艺，拥有最大的安装数量。

（3）电子束熔化（Electron Beam Melting, EBM） EBM3D打印技术通过使用高能电子束而不是激光来诱导金属粉末颗粒之间的熔合。聚焦电子束扫描一层薄薄的粉末，导致特定横截面的局部熔化和凝固。

电子束系统的一个优点是它们在物体中产生的残余应力较小，这意味着对支撑结构的需求较少，从而减少变形。EBM还使用更少的能源，并且可以

比SLM和DMLS更快地生成层。这种方法在航空、航天、国防、赛车摩托运动和医疗假肢等高价值行业中最为有用。然而，最小特征尺寸、粉末颗粒尺寸、层厚度和表面粗糙度通常低于LPBF和DMLS。EBM要求在真空中生产物体，并且该工艺只能使用导电材料。

(4) 多射流聚变 (MultiJet Fusion, MJF) MJF3D 打印技术本质上是 SLS 和材料喷射技术的结合，它使用喷墨阵列来应用熔合剂和细化剂，然后通过加热将其熔合成固体层，不涉及激光。带有喷嘴的托架，类似于喷墨打印机中使用的托架，经过打印区域，将熔合剂沉积在一层薄薄的塑料粉末上。同时，在轮廓周围喷射抑制烧结细化剂，以提高零件分辨率，从而使打印逼真的物体成为可能。高功率红外辐射能量源通过构建床并烧结分配熔剂的区域，同时保持粉末的其余部分不受影响。该过程一直重复，直到对象完成。

2.3 材料挤压成形

材料挤压成形是最常用和最便宜的3D打印技术，它代表了全球最大的3D打印机安装数量。材料挤压3D打印技术使用热塑性材料的连续长丝作为基材，细丝从一个线圈通过一个移动的加热打印机挤出机头进料，通常缩写为挤出机 (Extruder)。熔融材料从挤出机的喷嘴被挤出，并首先沉积到3D打印平台上，该平台可以加热以获得额外的附着力。第一层完成后，挤出机和平台在一个步骤中分开，然后可以将第二层直接沉积到正在生长的工件上，挤出机头在计算机控制下移动。挤出机至少需要三个轴才能在笛卡尔架构中移动，但极坐标和三角坐标架构系统也越来越普遍。后一层沉积在前一层之上，直到物体打印制作完成，这犹如使用一管牙膏来构建一个物体，通过将牙膏层彼此叠放来缓慢构建物体的墙壁，如图3所示。

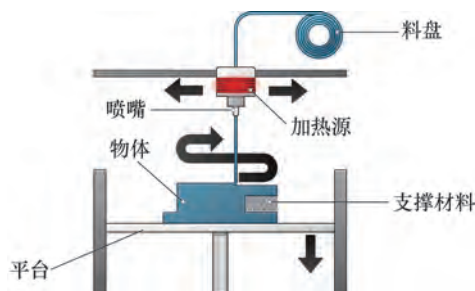


图3 材料挤压成形增材制造示意

材料挤压也被称为熔融长丝制造 (Fused Filament Fabrication, FFF)，是最受3D打印业余爱好者欢迎的工艺之一。专有术语熔融沉积建模 (Fused Deposition Modeling, FDM) 由 Scott Crump 在20世纪80年代后期创造，并于1990年由 Stratasys 公司商业化。随着这项技术的专利到期，现在有一个名为 RepRap 的大型开源开发平台，以及其他商业和 DIY 群体开始使用这种3D打印技术，这导致了可观的价格下降。

可以用来挤压打印的材料种类繁多，最受欢迎的是热塑性塑料，例如丙烯腈丁二烯苯乙烯 (ABS)、聚乳酸 (PLA)、高抗冲聚苯乙烯 (HIPS)、热塑性聚氨酯 (TPU)、脂肪族聚酰胺 (俗称为尼龙)，以及最新的高性能塑料，像聚醚醚酮 (PEEK) 或聚醚酰亚胺 (PEI)。此外，可以使用这种挤压3D打印技术材料的还有陶瓷、混凝土和巧克力等糊状材料。但是，材料挤压技术受尺寸精度限制，并且具有很大的各向异性。

由于FDM技术可以为3D打印机配备多个挤压头，以加快制造过程或具有打印多材料功能，这使得制造复合材料成为可能。复合长丝制造 (Composite Filament Fabrication, CFF) 就是其中之一。CFF是由Markforged公司发明的，它使用两个打印喷嘴。一个喷嘴按照典型的材料挤出工艺运行，它铺设塑料细丝以形成零件的外壳和内部矩阵；第二个喷嘴在每一层上连续地沉积复合纤维束（由碳、玻璃纤维或凯夫拉尔 Kevlar 制成）。这些3D打印部件内部的连续复合纤维束，为构建物体增加了与金属制成的部件相媲美的强度。除了将复合材料用于坚固的零件外，如何铺设也会影响零件的强度。Markforged 公司提供了两种铺设方法：各向同性纤维填充和同心纤维填充。

复合材料也可以在仅配备一个挤压头的机器上用材料挤出技术3D打印出来，唯一的条件是有足够的基础材料（热塑性塑料）来保证层之间的熔合。因此，在一根长丝中混合两种材料使得3D打印木材（将木颗粒嵌入PLA中）、金属（将金属颗粒嵌入热塑性塑料中）甚至碳（将碳纤维嵌入热塑性塑料中）成为可能。

FDM技术最常见的应用是打印电器外壳、形状和配合测试、夹具和固定装置以及熔模铸造模型。

2.4 黏结剂喷射

黏结剂喷射增材制造技术使用两种材料：粉末和黏结剂，它将黏结剂沉积在粉末材料的薄层上。黏结剂通常是液体，用作粉末的黏结剂。粉末材料是陶瓷基的（例如玻璃或石膏）或金属（例如不锈钢）。在黏结剂喷射3D打印过程中，3D打印头在构建平台X轴和Y轴上水平移动，沉积黏结剂液滴，以类似于在纸上打印墨水的2D打印机的方式打印每一层。当一层完成时，支撑打印物体的粉末床的平台会向下移动，一层新的粉末散布到构建区域上。该过程逐层重复，直到所有部分完成。打印后，零件处于生坯或未完成状态，需要经过额外的后期处理后才能使用。通常还添加浸润剂物质，以改善零件的力学性能。浸润剂物质通常是氰基丙烯酸酯黏结剂（在陶瓷的情况下）或青铜（在金属的情况下）。另一种策略是将处于生坯状态的工件放入烘箱中以实现物质颗粒的烧结。有趣的是3D打印一词最初是指将黏结剂材料一层一层地沉积到粉末床上的过程，该粉末床上带有类似喷墨打印机的头，如图4所示。

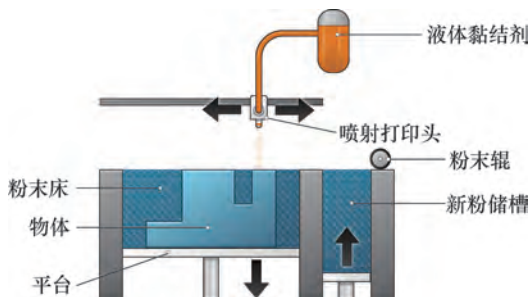


图4 黏结剂喷射增材制造示意

不同制造商开发了多种黏结剂喷射3D打印工艺技术。最有名的是3D Systems 的彩色喷墨打印技术（ColorJet Printing, CPJ）。ColorJet Printing原是ZCorp公司的商标，现在属于3D Systems公司。彩色喷墨3D打印是全彩色的，最终部件类似于砂岩，并呈现出一些多孔的表面。砂岩材料是喷墨着色的，并在3D打印过程中黏结在一起。在3D打印结束时，需要进行渗透以固化和黏结零件。它有数十万种颜色可供选择，几乎是完整的CMYK光谱。但是BJ最终的打印品不适合功能性应用，因为它们仍然是多孔的，并且必须远离潮湿环境，以避免变色。

黏结剂喷射3D打印工艺可以使用多种材料，

包括金属、砂子和陶瓷。有些材料，如沙子，不需要额外的处理。黏结剂喷射非常适合需要良好美学和形状的应用，例如建筑模型、包装、玩具和小雕像。由于零件的脆性，它通常不适合功能性应用。与PBF3D打印技术相比，黏结剂喷射方法的优点是在构建过程中不使用热量，从而防止在零件中产生残余应力。由于渗透工艺，金属基黏结剂喷射部件具有相对良好的力学性能，所以它们可以用作功能部件，并且因渗透过程而具有相对良好的力学性能。它们也比SLM或DMLS打印金属部件更具成本效益，只是打印部件力学性能较差，材料的晶粒没有完全熔合在一起。有多种类型的3D打印黏结剂材料，每种都适用于特定的应用。它们可分为呋喃树脂黏结剂（用于砂型铸造应用）、酚醛树脂黏结剂（用于砂型和型芯）、硅酸盐黏结剂（环保型，用于砂型和型芯）和水基黏结剂（用于金属）等类别。

2.5 材料喷射

在所有增材制造工艺中，材料喷射最能与喷墨打印工艺相媲美。与喷墨打印机将墨水逐层放置在一张纸上的方式相同，材料喷射将材料沉积到构建表面上，然后使用紫外光固化或硬化该层。逐层重复，直到对象完成。由于材料以液滴形式沉积，因此材料仅限于光敏聚合物、金属或蜡，它们在暴露于紫外线或高温时会固化或硬化。材料喷射制造工艺允许在同一部件内3D打印不同的材料，如图5所示。

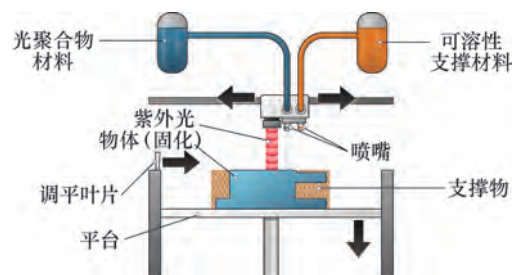


图5 材料喷射增材制造示意

材料喷射从打印头中的数百个微型喷嘴喷射出光聚合物，以逐层构建零件。这允许材料喷射操作以快速、线性的方式沉积构建材料，这可以与遵循路径以完成层（也称为切片）的横截面区域的其他点状沉积技术进行比较。当液滴沉积到构建平台时，用紫外线直接将其固化。材料喷射过程需要支

撑结构,通常也是在构建过程中同时使用可溶解材料来进行3D打印,然后在后处理步骤中去除支撑材料。

材料喷射是逼真原型的理想选择,可提供出色的细节、高精度和光滑的表面。材料喷射允许设计师在一次运行中使用多种颜色和多种材料,这使得该工艺非常适合低运行注塑模具和医疗模型。材料喷射技术的主要缺点是UV活化光聚合物的高成本和较低的力学性能。

材料喷射技术分为几类,其中最流行的几种技术如下。

(1) 按需滴注 (Drop On Demand, DOD) DOD打印机有两个打印喷嘴:一个用于沉积构建材料,另一个用于可溶解的支撑材料。与所有增材制造机器一样,DOD3D打印机遵循预先确定的路径并以逐点方式沉积材料以构建组件的横截面积。这些机器还采用飞刀切割每一层之后的构建区域,以确保在打印下一层之前形成完美平坦的表面。按需滴注技术通常用于在失蜡铸造、熔模铸造和模具制造应用中生产蜡状模型,使其成为一种间接3D打印技术。

(2) 多头喷射 (PolyJet) 多头喷射3D打印技术首先由Objet公司获得专利,现在是Stratasys的品牌。与喷墨文档打印相似,感光聚合物材料以与喷墨文档打印类似的方式将超薄层喷射到构建托盘上,每个光敏聚合物层在喷射后立即通过紫外光固化。一层又一层地重复喷射和固化步骤,产生完全固化的模型,可以立即使用。凝胶状支撑材料专为支撑复杂的几何形状而设计,可以用手或水射流轻松去除。

(3) 纳米粒子喷射 (NanoParticle Jetting, NPJ) 这种由XJet公司获得专利的材料喷射技术,其使用包含构建纳米粒子或支持纳米粒子的液体,该液体作为墨盒装入打印机并以极薄的液滴层喷射到构建托盘上。建筑外壳内的高温导致液体蒸发,留下由建筑材料制成的零件,该技术适用于金属和陶瓷。

材料喷射3D打印技术是制作逼真原型的绝佳选择,它可提供出色的细节、高精度和光滑的表面。材料喷射允许设计师设计在一次打印中打印多种颜色和多种材料。为了指定设计零件的特定区域为不

同的材料或颜色,必须将模型导出为单独的STL文件。当用混合颜色或材料特性以创建数字材料时,必须将设计导出为OBJ或VRML文件,因为这些格式允许在每个面或每个顶点上指定特殊属性(例如纹理或全色)。

使用材料喷射技术进行打印的主要缺点是成本高,并且紫外线活化的光敏聚合物会随着时间的推移失去力学性能并且会变脆。

2.6 片材层压

片材层压增材制造技术也称为层压物体制造(Laminated Object Manufacturing, LOM),包括叠加几层由薄片组成的材料以制造物体。每个薄片都用刀或激光切割成形,以适合物体的横截面,如图6所示。

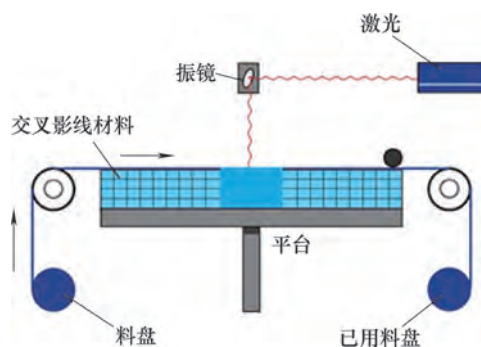


图6 片材层压增材制造示意

片材层压工艺包括层压物体制造(LOM)和超声波增材制造(UAM)两种。

(1) 层压物体制造 LOM与人们熟悉的覆膜机基本相同,若要层压一张纸,则将纸张放入由两种塑料组成的层压机袋中:外层为聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET),内层为乙烯-醋酸乙烯酯(EVA)。然后,一个加热的滚筒将袋子的两侧黏结在一起,使纸张完全包裹在塑料中。LOM构建对象的基本过程与此相同。

(2) 超声波增材制造 UAM通过熔合和堆叠金属条、片或带来构建金属物体,这些层通过超声波焊接结合在一起。该过程是在能够在构建层时对工件进行铣削的计算机数控CNC机床上完成的。该过程需要去除未结合的金属,通常是在焊接过程中。UAM使用铝、铜、不锈钢和钛等金属。该过程可以结合不同的材料,快速构建,并实际制造大型物体,同时由于金属没有熔化,因此需要的能量相

对较少。

LOM技术最初由 Helisys 公司开发, 然后被以色列公司 Solido 推广。Solido公司3D打印机基于LOM技术, 并生产由聚氯乙烯(PVC)和专有黏结剂组合而成的部件, 从而生产出坚固但价格低廉的模型。后来, 总部位于爱尔兰的 Mcor Technologies 公司发明了一种基于纸张的层压技术。LOM的最新发展使采用碳纤维板和各种复合材料的打印成为可能, Envision TEC 公司和 Impossible Objects 初创公司已经掌握了这些技术, 但这些技术仍处在其制造商的继续开发中, 尚未广泛应用。

在纸基层压物体制造中, 纸张材料取自标准复印纸。首先, 纸张通过标准喷墨2D打印机进行着色, 然后将构建最终部件所需的所有彩色页面堆叠在3D打印机中, 并一张一张地使用它们。因此, 每一页都从堆栈中取出, 黏在前一页上, 然后用刀精确切割。工件逐层完成, 剩余的纸张可以用手取出。纸模型可以完全着色, 具有类似木头的特性, 并且可以相应地加工和完成。结果的精度主要取决于所使用的分层材料的厚度, 例如纸张。一张标准纸的厚度在 $50 \sim 100 \mu\text{m}$ 。

美国初创公司 Impossible Objects 获得了基于复合材料的增材制造(Composite Based Additive Manufacturing, CBAM)技术的专利。纤维增强复合材料与热塑性塑料熔合可形成非常坚固的部件。

EnvisionTEC公司开发了选择性层压复合物体制造技术(Selective Lamination Composite Object Manufacturing-SLCOM)。选择性层压复合物体制造技术使用热塑性塑料作为基材而编织纤维复合材料。

片材层压3D打印技术的应用包括人体工程学研究、地形可视化、纸制物体的结构模型。使用热塑性塑料和纤维, 层压3D打印技术以极具竞争力的成本, 可直接制造用于航空航天和汽车行业的功能性轻质部件。

2.7 定向能量沉积

定向能量沉积3D(DED)打印技术, 通过直接熔化材料并将它们逐层沉积在工件上来制造零件。这种增材制造技术主要用于金属粉末或线材原材料。DED 技术包括激光近净成形(Laser Engineered Net Shaping, LENS)、定向光制造(Directed Light

Fabrication, DLF)、激光直接金属沉积(Laser Direct Metal Deposition, LDMD)、激光沉积焊接(Laser Deposition Welding, LDW)和3D激光熔覆(3D Laser Cladding)等, 如图7所示。

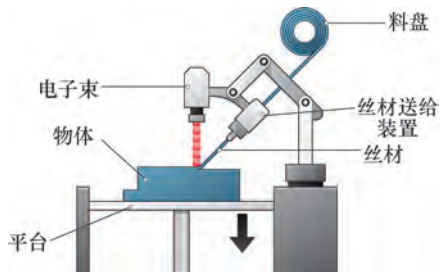


图7 定向能量沉积增材制造示意

金属可以通过DED增材制造技术进行3D打印, 特别是包括铝、铜、钛、不锈钢、工具钢、铜镍合金和几种钢合金。除了能够从头开始构建零件(通常与铣/车CNC机床的使用混合), DED3D打印技术还能够修复复杂的损坏零件, 例如涡轮叶片或螺旋桨。由于大多数DED3D打印机是占地面积非常大的工业机器, 并且需要在封闭和受控的环境下运行, 因此典型的定向能量沉积由安装在封闭框架内的多轴臂上的喷嘴组成。该喷嘴将熔化的材料沉积到工件表面上, 并在那里固化。该过程在原理上类似于材料挤压3D打印技术, 但使用DED, 喷嘴可以在多个方向上移动, 最多有5个不同的轴, 而大多数FFF机器只有3个轴。

DED有几种不同的技术, 它们以材料熔合的方式不同来区分, 每种材料都适用于不同和特定的目的。DED3D打印技术的每个子技术都有其自身的局限性和兼容性, 最常见的有如下几种。

(1) 激光粉末成形(LENS)技术 激光粉末成形也以其专有名称LENS而闻名, 该名称由美国桑迪亚国家实验室命名。该工艺使用由激光头、粉末分配喷嘴和惰性气体管组成的沉积头。当粉末从喷嘴喷出时, 沉积头将粉末熔化以逐层构建物体。激光在构建区域形成一个熔池, 粉末被喷射到熔池中, 在那里它被熔化然后固化。商业化的LENS设备, 如Optomec公司的LENS 3D制造系统直接使用激光从粉末金属、合金、陶瓷或复合材料中逐层构建物体。LENS工艺必须在充满氩气的密闭室中进行, 以使氧气和水分含量保持在非常低的水平, 这样可以保持零件清洁并防止氧化。金属粉末材料直

接输送到材料沉积头，一旦沉积了单层，材料沉积头就会移动到下一层，通过构建连续的层来构建整个部件。完成后，部件将被移除，并可进行热处理、热等静压、机加工或以任何需要的后处理方式。

(2) 激光定向能量沉积 (Laser Direct Energy Deposition, LDED) 激光定向能量沉积也称激光直接金属沉积 (Laser Direct Metal Deposition, LDMD)，其特点是同步送粉。它将三维模型分散化为二维层，类似于 LPBF。但 LDED 可以使用线材或粉末（或两者）作为原料，添加剂材料被输送到熔池中，而不是散布到粉末床上。与 LPBF 技术相比，LDED 技术利用更高的激光功率和更大的激光束尺寸，来实现更高的构建效率。

(3) 气溶胶喷射技术 (Aerosol Jet) 气溶胶喷射 3D 打印技术提供了一种高效、经济、可扩展的工艺，可将功能性天线和传感器直接打印到消费和工业组件上，使其成为智能物联网 (IoT) 设备。可印刷的天线包括 LTE、NFC、GPS、Wifi、WLAN 和 BT。这种技术更接近于简单的沉积技术，但适用于复杂的复合曲面。气溶胶喷射系统非常适合开发、制造、增强和修复用于消费电子产品、半导体封装、显示器、航空航天、国防、汽车、生命科学以及高性能电子和生物设备。气溶胶喷射技术可用于多种材料，包括导电纳米颗粒金属油墨、介电浆料、半导体和其他功能材料。商业化的气溶胶喷射 3D 打印机由 Optomec 公司生产。

(4) 电子束增材制造 (Electron Beam Additive Manufacturing, EBAM) 电子束增材制造使用电子束通过将金属粉末或金属丝焊接在一起制造金属物体，最初是设计用于太空的真空下工作。与使用激光的激光粉末成形相比，电子束效率更高，它是一种可生产大规模金属结构的增材制造技术。电子束 (EB) 枪通过线材原料逐层沉积金属，直到零件达到近净形状并准备好进行后期的精加工。材料沉积速率为 3~9 kg/h。相容的金属包括钛、钽和镍。这种电子束增材制造技术也可用于修复损坏的零件。

(5) 激光沉积焊接 (Laser Deposition Welding, LDW) 和混合制造 (Hybrid Manufacturing) 德马吉森精机公司 (DMG

MORI) 的激光沉积焊接和混合制造增材制造工艺使用粉末喷嘴的金属沉积，其速度比 LPBF 技术快 10 倍。此外，德马吉森精机公司已将其 LDW 增材制造技术集成到 5 轴铣床上。这种创新的混合解决方案将激光金属沉积工艺的灵活性与切割工艺的精度相结合，从而实现了铣削质量的增材制造。这种组合，使得制造各种尺寸的高精度金属零件成为可能。

3 金属激光增材制造技术

激光增材制造技术已经成为航空、航天、医学等领域实现智能制造的关键技术。以激光为热源的激光增材制造可以彻底改变金属零件的传统加工方式。根据 ASTM 标准 F2792-12a 的分类和定义，它由两种主要方法组成：一种是激光粉末床熔合 (LPBF)，它具有用于沉积金属粉末的粉末床，将粉末散布在基材上；另一种方法是以粉末为原料的定向能量沉积工艺，即激光定向能量沉积 (LDED)，其特点是同步送粉。目前，LAM 技术在航空、航天、医疗和汽车等领域的应用和发展是最快的。由于金属零件的制造是相关领域的主要关注点，因此我们重点谈一下金属的激光增材制造技术。

随着金属零件的功能性能和结构复杂性的提高，传统技术（例如铸造和锻造）制造的难度、成本和周期迅速增加。LAM 技术既先进又与资源经济兼容，可为高性能和复杂结构的制造提供新的解决方案。在 LAM 的帮助下，拓扑优化结构、晶格结构、梯度材料结构和内部通道结构的制造不再难以而为。因此，人们可以打印具有结构功能一体化、减重、超高强度和韧性、耐极端工况或超强散热能力的新型结构，并在很大程度上提高结构的功能效率。美国通用电气公司的 LPBF 航空发动机燃油喷嘴和北航钛合金制成的 LDED 飞机框架，就是成功应用的典型案例。但是，从 LAM 技术的发展现状来看，目前真正的工业应用还不多。基础理论研究、关键技术突破、工程应用成熟度、技术发展的商业推广等是制约 LAM 技术产业化应用的一些因素。目前的研究主要集中在性能控制方面，孔隙率、开裂、显微组织特征、各向异性等基础研究受到较多关注。相反，有关形状控制、质量检验、产品标准等方面的研究报告稀缺，这也预示着金属的 LAM 正

处于从技术发展到工业应用的过渡阶段。

LAM是基于数据模型的切片,通过增量沉积,即逐层实现金属零件的近净成形制造。由于LAM特别适用于形状复杂的零件、具有梯度材料和性质的结构的零件、复合材料零件和难加工材料零件的制造,因此在航空航天等先进制造领域受到广泛青睐。一方面,这些领域的相关零件形状复杂多变,对材料性能要求高,通常加工性差,成本高;另一方面,为实现性能复杂、寿命长、可靠性高、成本低,新型飞行器迫切需要采用大型复杂的集成结构。

3.1 激光粉末床熔合

激光粉末床熔合 (Laser Powder Bed Fusion, LPBF) 也称选择性激光熔化 (SLM)。LPBF是一种采用快速成形原理的增材制造技术,即先在计算机上通过软件设计实体模型的三维部分,然后对数据进行切片,通过专用软件得到三维模型各截面的轮廓数据。数据被导入快速成形设备,然后控制激光束选择性地熔化每一层的金属粉末,并根据这些轮廓数据逐渐堆叠成三维金属零件。激光束快速熔化金属粉末,获得连续熔合通道,可制造几乎任何形状且冶金结合完整、高精度致密的金属零件,LPBF的工艺流程如图8所示。

在成形过程中,右侧粉筒上升一个设定值,粉辊向左侧移动,左侧成形筒板上均匀涂上一层粉末,然后通过LPBF熔化金属粉末层,逐层形成三维金属零件。需要注意的是工艺参数,如激光功率、扫描速度等,应与粉末材料和粉末层厚度相匹配,以实现致密且无缺陷的零件。整个过程在具有惰性

气体保护的成形室中进行,以防止金属在高温下与其他气体发生反应。LPBF设备中现有的粉末涂装装置对铁基、镍基、钛基等金属粉末材料的适用性较高,但对铝合金粉末的适用性较低,导致其LPBF成形工艺不容易顺利进行。

LPBF制造的零件通常具有以下特点。

- 1) 可达到的相对密度通常高于95%,甚至99.9%。
- 2) 小激光束尺寸使构建的零件具有高尺寸精度(可达到的最高精度为 $\pm 0.05\text{mm}$)和优异的表面质量($Ra \leq 10\mu\text{m}$)。
- 3) 快速冷却和凝固速度导致极细的微观结构(一次枝晶臂间距通常为数百纳米),这使其与铸件和锻件相比具有优越或相当的机械强度。

LPBF制造的局限性如下。

- 1) LPBF技术通常用于制造相对较小且精密的零件,主要是因其构建效率低且尺寸精度高。
- 2) LPBF过程中的粉末球化很难以消除,导致细孔的形成和力学性能的劣化。
- 3) 由快速加热和冷却速率(高达 $10^6 \sim 10^8 \text{K/s}$)引起的不均匀温度分布会引起较大的残余应力,从而导致变形甚至裂纹形成。

由于对制造精度的要求很高,以及加工腔室对零件尺寸的限制,所以LPBF常用于形成复杂的中小尺寸精密结构。LPBF零件的功能属性一般大于承载属性,为满足整体性能要求,许多部件需要创造性地设计结构,例如具有复杂内油道、气道和内腔的燃料喷嘴、轴承座、控制系统外壳、航空发动机中的叶片和舱口轴承、铰链、进气门和飞机辅助发动

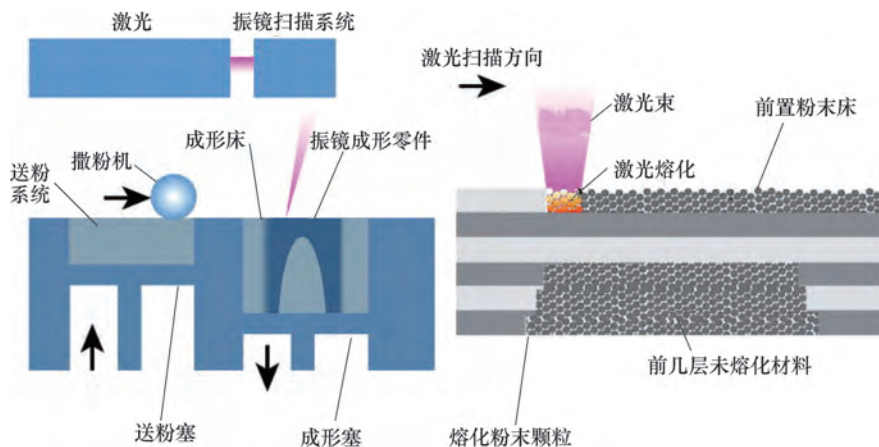


图8 激光粉末床熔合增材制造工艺流程

机室单元结构的排气门,以及卫星中的支撑结构,这些部件都适合使用 LPBF来制造。LPBF有利于实现材料加工的“近净成形”新概念,特别适用于制造结构复杂的金属零件,以满足生物医学、国防、航空航天等领域的有限订单要求或特殊定制要求和应用,特别是射频元件。随着制造业的不断升级、科技的发展和应用推广的需求,利用LPBF直接制造功能部件已成为其发展的主要方向。

3.2 激光定向能量沉积

激光定向能量沉积技术(LDED)是20世纪90年代初期由世界各地的许多研究机构独立开发的。因此,历史上它有许多不同的术语,例如激光固体成形、激光金属沉积、激光工程近净成形等,但是技术原理本质上是相似的。本文使用根据 ASTM F2792-12a 规定的术语——LDED。

粉末基 LDED 的技术机理如图9所示。

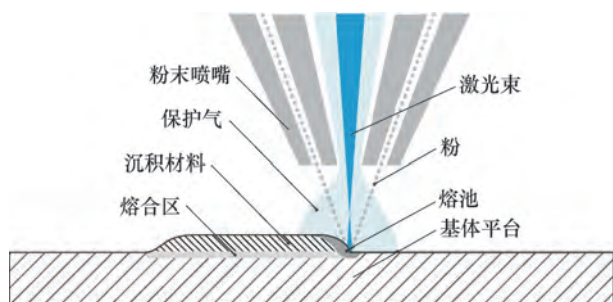


图9 激光定向能量沉积技术机理

LDED 将三维模型离散化为二维层类似于SLM,但 LDED 有可能使用线材或粉末(或两者)作为原料。添加剂材料被输送到熔池中,而不是散布到粉末床上。与LPBF技术相比,LDED技术利用更高的激光功率和更大的激光束尺寸来实现更高的构建效率。此外,LDED非常适用于使用多种材料同步进给的梯度结构制造,以及高性能和高价值部件的修复。然而,使用LDED技术难以制造几何形状极其复杂的零件,这在一定程度上限制了其应用。

由于成形的零件虽力学性能好,但形状精度不高,所以LDED主要用于制造中大尺寸的复杂承重零件。相应地,LDED零件的承载属性大于其功能属性。为了提高航空发动机中复杂结构的效率和功能,例如外壳、压气机或涡轮叶盘,应采用异种或功能梯度材料的结构。飞机上的部件,如关节、起

落架、承重框架、超高速飞行器机翼或风舵的单元结构的承重框架,应在减轻重量的同时增加承重能力。通过拓扑优化设计,制造这些结构的复杂性和难度产生了对 LDED 技术的明确需求。此外,对于飞机或航空发动机中具有特殊形状的承重部件,如局部凸台或凸片,采用锻造工艺在制造过程中不仅难以保证局部配置和性能,而且目前的锻造设备无法生产出专为大型飞机设计的超大尺寸钛承重框架。因此,对混合锻造/增材制造和混合锻造/增材连接技术的发展提出了明确要求。

4 金属激光增材制造设备

经济且高效的激光增材制造(LAM)设备是其技术广泛应用的基础。国际上,LPBF设备主要集中在德国、法国、英国、日本和比利时,而LDED设备主要集中在美国和德国。德国比任何其他国家都更早地开始开发 LPBF设备,其中EOS GmbH公司开发的LPBF设备具有一定的技术优势,部分已用于GE设计的LEAP航空发动机燃油喷嘴的制造上。通过在制造过程中增加监控功能,可以进一步提高产品质量。德国Realizer GmbH公司开发了一种独特的解决方案,具有全方位的设计和组件堆叠。德国Concept Laser GmbH公司开发的设备在制造大型部件方面具有显著优势。SLM Solutions Group AG公司在激光应用和气流控制方面处于领先地位。专业的粉末沉积系统已成为美国3D Systems掌握的技术壁垒,该技术可以制造具有精确细节的组件。英国雷尼绍PLC公司在材料应用的灵活性和更换的方便性等技术特性方面处于领先地位。美国EFESTO公司的LDED设备具有制造大型LAM金属部件的技术优势。它的打印尺寸可达2100mm×1500mm×1500mm。美国Optomec公司开发的LDED设备,配备5轴移动工作台和1500mm×900mm×900mm工作室,最高成形速度可达1.5kg/h。德国企业提供的一体化激光加工系统也是主流的LDED设备。

另外,混合增材/减材制造设备近年来已成为全球市场热点。德马吉森精机公司开发的LDED设备配备2kW激光设备和5轴CNC铣床,比传统粉末床快了近20倍,并且能够在制造过程中铣削原先成品中无法到达的位置部分。日本MAZAK公司引进了具

备5轴车铣复合加工能力的设备,可应用于多边形锻件或铸件、旋转件、复杂异形件等零部件的制造。

国内对LPBF的研究起步较晚,20世纪90年代初。西安交通大学、华中科技大学、清华大学、北京龙源公司在成形设备、典型软件、材料等方面取得了重大进展。随后,国内多所高校和研究机构,如西北工业大学、北京航空航天大学、华南理工大学等单位开展了相关研究,从事钛合金、铝合金等轻合金的LPBF研究。因此,国内金属3D打印LDED和LPBF设备的研发能力比较强,具有一定的市场应用份额。南京航空航天大学团队系统开发了高精度、复杂结构、近净成形、形状和性能可控的钛基金属元件。西北工业大学团队在航空领域对高性能金属的增材制造工艺进行了深入研究,并成功修复了航空发动机叶片,开发了部分金属零件。北京航空航天大学团队长期致力于大型钛合金结构的激光直接制造工艺、内部质量控制及应用研究,高性能金属构件制造工艺已成功应用于研制了多种国产大飞机。西安交通大学团队对钛合金激光增材制造工艺进行了深入研究。基于粉末聚焦控制、组合扫描模式、逐层功率控制等成形工艺基础,成形出复杂的钛合金整体涡轮叶片样品。华南理工大学团队专注于LPBF设备的研发,先后开发了DiMetal-240、DiMetal-280、DiMetal-100等型号的LPBF设备。西安博莱特激光成型技术有限公司(以下简称西安博莱特)自主研发了LPBF系列设备和激光高性能修复系列设备。南京中科宇辰激光科技有限公司研发了自动变焦同轴送粉嘴、远距离送粉机、高效惰性气体循环净化箱等核心装置,生产了一系列金属LDED设备。此外,北京亿嘉3D科技有限公司和北京星航机电设备有限公司(以下简称北京星航)在工业和小型金属LPBF设备的小批量生产方面也取得了一定的进展。上海航天装备制造厂有限公司(以下简称上海航天)在标准、大型LPBF设备和机器人LDED设备研制方面取得了较好的进展。

5 金属激光增材制造应用

激光增材制造(LAM)技术可帮助航空航天公司在无需成形和锻造的情况下制造极其复杂的零件,缩短生产周期,减少部件重量和设备所需的零件数量,从而节省成本并提高可靠性,例如,钛

合金的LAM已在航空领域得到应用。美国某舰载战斗机率先采用LDED钛合金部件作为承重部件。Carpenter Technology公司通过增材制造使用定制的高强度不锈钢生产先进的航空齿轮。用LDED制造的耐腐蚀支架用于F-22飞机,大大减少了维护时间。另外,LDED整体框架已在英国成功应用于无人机。

同样,LPBF技术也已广泛应用于航空发动机复杂零件的制造。GE率先将LPBF温度传感器外壳应用于高压压缩机,获得美国联邦航空管理局的批准,并已用于400多台GE90-40B航空发动机。GE为LEAP航空发动机设计的燃料喷嘴也使用LPBF技术制造,并且在2020年以后,以每年44万个的速度制造。普惠(Pratt & Whitney)集团使用LPBF生产了用于PW1100G-JM航空发动机的管镜套筒。包含48个翼型导叶的LPBF钛合金前轴承组件已用于劳斯莱斯公司(Rolls-Royce)设计的遑达XWB-97航空发动机。西北工业大学和北京航空航天大学是我国在航空制造领域研究增材制造技术最具代表性的单位。西北工业大学完成了飞机用超大型钛合金法兰的LDED制造,在成形精度和变形控制方面达到了新的门槛。2016年,西北工业大学和中国航天科工集团31院在涡轮发动机应用领域的SLM应用取得突破,实现了转子零件的LPBF,这是国内首次实现LPBF成形转子零件的工艺。北京航空航天大学开发了大型钛合金结构件的LDED内部缺陷和质量控制等关键技术。沈阳航空航天大学提出了区域扫描成形方法,利用LDED工艺可以有效控制零件的变形和开裂。格瑞玛特工程技术研究院突破了TC11、TA15/Ti2AlNb异质材料界面质量控制和叶盘与入口复杂形状综合控制等难题,产品通过了测试评估。

2012年,LAM技术开始应用于航天器制造。NASA使用LPBF生产的弯曲接头已应用于RS-25火箭发动机,从而减少了约60%的零件数量、焊缝和机加工工作。与传统制造工艺相比,设计制造一体化的氢氧火箭发动机零部件数量减少80%。法国Thales公司采用LPBF技术为Koreasat5A和Koreasat7通信卫星制造TT&C天线支撑元件,与传统工艺相比,重量减轻了22%,成本降低了30%。

LAM的推广应用加快了航天飞行器的结构拓扑优化和晶格结构设计。由于采用了LAM的集成制

造, Astrium公司的Eurostar E3000卫星平台遥遥遥控天线的铝合金安装支架整体质量减轻了约35%, 结构刚度提高了40%。Cobra Aero 公司与 Renishaw PLC 公司合作, 利用 LAM 技术完成了具有复杂点阵结构的发动机集成部件的制造。此外, 还应用了混合增材/减材制造技术。维珍轨道公司 (Virgin Orbit) 使用混合增材/减材制造技术制造和改进了火箭发动机燃烧室的部件, 并在2019年进行了24次发动机测试。

国内金属LAM应用LDED主要用于制造承重结构。北京航空航天大学生产的主承重框架、主起落架等部件已应用于航天飞行器、燃气涡轮发动机等设备。航空工业沈阳飞机设计研究院通过工程应用验证, 推动LDED技术成熟, 实现了8类金属材料、10类结构件的飞机应用。航空工业第一飞机设计研究院实现了LDED外主襟翼滑轮架和尾舵臂在大型飞机上的安装应用。北京机电研究所已实现大型薄壁骨架舱结构的LDED制造及应用。

国内金属LAM应用LPBF主要用于制造形状复杂的零件。在航空领域, 中国航空制造技术研究院实现了LPBF产品的安装应用, 成都航空工业飞行器设计研究院辅助使用了带孔格结构的LPBF进风门和出气门电源室。航空工业直升机设计研究院实现了SLM部件在通风格栅结构、防雨密封结构、进气道多腔结构等方面的安装应用。在航空航天领域, 上海航天的LPBF产品罐体间断支架、空间散热器、导向装置等已安装应用。北京星航的客舱结构、操纵面等LPBF产品通过地面和飞行试验验证。北京机电研究所实现小型复杂零件LPBF, 控制面、支架等产品技术成熟度达到5级。将LPBF应用于制造大尺寸薄壁钛合金晶格夹层结构 (集热窗框), 可满足深空探测飞行器严格的技术要求。此外, 西安博莱特每年可为航空航天领域提供8000多个SLM零件。华中科技大学利用增材/减材组合制造制造了具有随形冷却通道的梯度材料模具, 这种方式制造的模具已在行业中得到广泛应用。中航北京航空材料研究所已完成对LAM技术的综合研究。LDED制造的镍基双合金涡轮叶盘已通过超旋转试验检验, 增材制造修复的IL-76飞机起落架已批量应用。开发了LAM超声扫描评价系统, 建立了检测标准和参考块。评价结果和无损检测技术已应用于飞机滑轮架、框架等

要安装在飞机上的部件的批量检测。

在LPBF方面, 国内在形状尺寸、表面粗糙度精确控制等方面取得了进展。西安博莱特SLM加工的内通道零件最小直径约0.3mm, 薄壁零件最小壁厚约0.2mm; 零件整体尺寸精度为 $\pm 0.2\text{mm}$, 表面粗糙度 $Ra \leq 3.2\mu\text{m}$ 。南京航空航天大学将LPBF精密制造视为通过过程控制提高零件综合性能的主要因素。西安交通大学已将LPBF应用于空心涡轮叶片、航空推进器、汽车零部件等制造。

LAM技术在国内医疗行业的应用始于20世纪80年代后期, 最初主要用于快速制造3D医疗模型。近年来, 随着增材制造技术的发展和精准化、个性化医疗需求的增长。增材制造的生物材料, 如316L不锈钢、Ti6Al4V和CoCr广泛用于临床实践。LPBF在医疗行业的应用不断增长, 并逐渐用于直接制造骨科植入物、定制假体和假体。国内也有一些企业在生物医学的LPBF方面进行了研究和探索, 如常州沃森医疗器械、创生医疗器械、广州麦普林及深圳康泰健等企业。常州沃森医疗器械针对不同地区 (尤其是针对我们亚洲人体) 开发了全系列的骨科产品。包括脊柱系列、创伤系列 (不锈钢及钛合金钢板系列、接骨螺钉系列及髓内钉系列)、新型锁定钢板系列、人工关节及假体系列骨科产品。

东莞EONTEC致力于开发可降解镁合金骨科植入物产品, 有望在短期内实现可降解镁合金的临床应用。可降解镁合金被认为是新一代生物医用材料, 与传统材料相比具有诸多优势, 符合生物医用材料的发展趋势, 可用于开发具有独特性能的新型医疗器械。其临床应用将成为生物医用材料发展的里程碑。

LAM技术在模具中也得到越来越多的应用。从全球来看, 模具生产主要集中在中国、日本、美国 and 德国。目前, LPBF技术在模具领域的应用主要集中在带冷却通道的高端金属模具的生产上, 可提高高端模具的制造能力。东江模具、东莞瑞泰、深圳阳光、上海瑞斯模激光等中国公司已经将LPBF技术成熟地应用于模具制造。如东江模具采用LPBF工艺在模具内制造随形水路, 大大提高了模具冷却效率。注入周期提高21.7%, 注入成本降低11万元, 月经济效益增加9.4万元。上海UREAL 3D科技研发的波轮洗衣机模具通过水路平衡分布的设计, 提供

优越的冷却一致性,保证产品收缩均匀,提高产品质量。内部高效随形水路不受形状限制,完全贴附在模具表面,大幅提高模具冷却效率,减少因模具温度不均造成的变形。

LAM技术除了在生物医药、模具制造、航空航天等领域的应用外,在珠宝首饰、汽车、家电、文化创意、创新教育等领域的应用趋势也在不断深化。未来,珠宝的个性化和定制化将进一步发展,为消费者带来更多选择,以及在文化创意和创新教育领域。

技术研发和装备开发都要以产业发展为导向,以产业链整合提升市场竞争力。作为技术发展的主体和最大受益者,应用企业更加关注产品的制造质量和生产成本。因此,在应用企业中整合材料、工艺、设备、验证、标准和人员培训将更有效率,以促进LAM技术的发展。GE收购了一系列制造质量控制公司和增材制造设备公司以加强LAM产业链的完整性,在全球LAM行业应用方面处于领先地位。产业整合战略大大地促成其领先地位。此外,GE在全球拥有300多个工业制造设施。跨国公司更加重视LAM产品制造的员工培训,如GE建立了配备专用设备的增材制造培训中心,每年可培训数百名工程师。

6 国内金属激光增材制造技术面临的挑战

6.1 打印材料的设计和制备

材料基因组学技术(Material Genomics Technology)可以用来缩短打印材料的研发周期,降低研发成本,在国外已成功将其应用于相关打印材料的设计。国内材料基因组学技术及其在改善LAM特种材料性能方面的应用研究相对较少,因此LAM专用材料设计理论和方法还比较薄弱。在粉末制备方面,国内真空雾化技术比较成熟,不锈钢和镍基合金粉末的性能基本可以满足成形工艺的要求。但由于钛合金和铝合金超细粉体的制备存在较大差距,主要问题是粉体球形度差,细粉成品率低,不能满足LPBF的成形要求,因此许多实际应用仍然依赖进口。但是这种状况正在逐步改善。

6.2 打印设备的设计和制造

打印设备是我国与欧美LAM技术强国的主要差距之一。国产设备的加工尺寸、稳定性、加工精

度,以及处理器、存储器、工业控制器、高精度传感器、数/模转换器等基础器件的质量和性能有待提高。工艺装备核心装置和关键部件,如高光束质量激光器、光束整形系统、大功率激光扫描振镜、动态聚焦透镜等精密光学器件及高精度喷嘴加工头等核心零部件方面缺乏自主研发能力。国内粉体流动状态和熔池状态的过程监控控制软件还不够完善。与材料研发一样,这种状况也正在逐步改善。

6.3 打印工艺研究不足

目前,在打印工艺研究中,尚未建立应力变形、开裂控制等有效方法;零件内部显微组织和缺陷问题没有得到很好地解决,零件力学性能的均匀性和批次稳定性均欠佳。尤其是先进航空发动机和高速飞行器超高温结构材料的LAM工艺研究更欠缺。同时在数据设计、数据处理、工艺库、工艺分析与智能规划等软件技术、在线检测与监控系统、成形工艺自适应智能控制、具有自主知识产权的LAM核心配套软件系统等方面均有不足。

6.4 打印产品的尺寸精度和表面粗糙度

国内LAM技术对主要材料典型结构的性质和形状的控制还不成熟,它涉及到原材料控制、工艺设备、成形工艺、热处理、机加工、表面处理、非破坏性测试和验证测试等。LDED打印的飞机结构件一般都有加工余量,因此尺寸精度和表面粗糙度不一定是关键的约束。但是,涡轮增压发动机的大部分部件结构复杂,具有内部流动通道和空腔。LPBF打印的尺寸精度约为0.1mm,表面粗糙度约为 $Ra6.3\mu m$,说明LPBF与精密铸造之间仍有差距。另外,还有零件均匀性和批量稳定性,以及内表面加工和加工速度等技术问题尚待解决。

6.5 技术人员匮乏

LAM产业的健康发展,需要从材料、工艺、设备、测试、标准及人员培训等全产业链的整合。但是,目前高等院校和职业技术学院设立LAM相关专业和课程的甚少,为国内众多行业的设计师、技术人员、设备操作人员提供LAM专项培训的培训中心也屈指可数,造成从事LAM的技术人员匮乏,极大地影响了增材制造技术的推广和应用。

6.6 金属激光增材制造的标准和指南的制定

国内3D打印行业缺乏控制质量的产品标准,这也因此导致没有被行业内接受的统一的设计、材

料、工艺、检验、微观结构,以及产品的性能、尺寸精度等方面的标准。由于缺乏一些基础数据,如零部件的无损检测、力学性能、冶金图谱等,所以导致产品标准难以制定,进而也大大影响了金属LAM的工业应用和推广。

7 国外金属激光增材制造技术面临的挑战

虽然激光3D打印或增材制造已经取得长足的进步,但是无论是技术方面还是经济方面,它还面临着许多挑战。以航空航天工业为例,众所周知,激光增材制造正在改变航空航天工业的所有领域,包括商用和军用飞机、太空应用以及导弹卫星系统。这种转变是由于LAM 具有独特的能力来生产这些领域所需要的相当复杂的零件,同时帮助降低制造成本(即减少材料浪费、无需零件组装以及减少对工具和固定装置的需求),缩短周转时间以及以小批量生产制造零件等优势。LAM具有制造任何形状设计的能力,使其非常适合航空航天业。对于金属部件,航空航天应用中的主要增材制造技术是定向能量沉积和粉末床熔合。然而,由于对尺寸、微观结构、潜在缺陷、表面粗糙度和残余应力控制不足,因而导致零件质量和力学性能的变化可能会导致阻碍LAM零件在高价值或关键部件中的使用。为了确保LAM零件的质量和一致性,并使其被更广泛的使用,LAM的硬件需要强大的质量管控和资格认证(Q&C)程序。不幸的是,具有高质量的Q&C程序文件并不存在,这迫使航空航天公司去建立自己的质量管控和资格认证程序。此外,监管机构对零件和系统认证的要求和解释仍在不断发展之中。控制零件质量、尺寸和力学性能的这些挑战在其他行业的金属激光增材制造应用中也 very 常见,因此它们具有一定的共性。

其他常见的挑战包括以下几个方面。

(1) 生产速度慢 目前,许多工业3D打印机在速度和效率方面仍然落后于传统机械化设备。这成为LAM被广泛应用的障碍,尤其是在汽车和消费品等由大规模批量生产驱动的行业。在这些行业中,需要在尽可能短的时间内制造和交付产品,以保持生产效率。

(2) 打印成本高 多年来,传统制造已成为一种精致且极其高效的工艺。在未来几年内,3D 打印

由于其流程不够完善和精简,所以成本可能相对昂贵。例如,大公司所需的金属打印机需要花费数万至数十万美元。由于3D打印所需的时间取决于需要打印的层数以及打印机本身的速度,因此打印速度慢意味着打印成本高。即使是最好的3D打印机,每小时也只能打印 5~60cm。

(3) 有限的打印材料和打印材料特性的不一致 与经历了数百年材料开发的传统制造工艺相比,3D打印自身的材料开发才刚刚开始,虽然3D打印可以使用多种塑料和金属制造物品,但可用的原材料选择并不详尽,这是因为并非所有金属或塑料都可以控制到足以进行3D打印的温度。此外,由于目前该行业缺乏具有经过验证的打印参数和定义规格的可靠材料数据库,因此实现一致且可重复的3D打印过程变得具有挑战性。

(4) 缺乏行业标准 3D打印的主要问题之一是机器缺乏标准化,以及产品质量的标准化。打印技术缺乏通用标准——许多制造商担心他们通过3D打印生产的产品在质量、强度和可靠性方面没法与其他制造方法相当。因此,他们仍然对3D打印技术持保留态度,认为所涉及的风险太大从而无法获得收益。最近,人们希望通过推动增材制造的行业标准化来结束这种不确定性。

(5) 软件的挑战 设计和数据准备仍然是这个行业的瓶颈。目前LAM机器仍然需要通过多个软件解决方案来分别传输LAM设计数据,这导致设计过程耗时且容易出错。尽管在增材制造设计和打印准备方面取得了很大进展,但仍有发展空间。让设计人员能够在CAD环境中修改3D模型并快速迭代它们而无需繁琐的数据转换,这将是让设计和数据准备挑战成为过去的关键。

(6) 打印后期处理 大多数3D打印部件需要某种形式的打印后期处理或清理,以从构建中去除支撑材料并平滑表面以达到所需的表面质量。所需的后期处理量至少取决于以下因素:生产零件的尺寸、预期的应用和用于生产的3D打印技术的类型。

(7) 版权问题 随着3D打印变得越来越流行和易于使用,人们制造假冒伪劣产品的可能性越来越大,几乎不可能区分它们,这就造成了版权和质量控制方面的问题。

(8) 劳动力挑战 目前没有足够多的工程师、

经理和高管真正了解3D打印技术，这致使他们在制定战略时不明白3D打印技术能给他带来什么或能做什么，结果，本该从该技术中受益的企业却不愿意采用它，因为他们缺乏对3D打印技术能力的透彻了解，而无法做出相应的采用3D打印的商业案例。

(9) 脱节的行业生态系统 整个增材制造生态系统目前是支离破碎的，为了使增材制造工艺在工业层面上规模化，增材制造价值链——从产品的概念到生产和后期处理，需要进行整合。目前，市场上充斥着许多不同的解决方案，希望采用增材制造技术的公司面临着购买不同解决方案并试图让它们协同工作，这种增材制造价值链中缺乏整合，还会导致工作流程效率低下。而在理想情况下，这些解决方案完全可以集成在一起，以创建一揽子解决问题的产品，从而简化采用增材制造技术的要求。

8 展望和总结

激光3D打印或增材制造是一种创新工艺，它的诞生和成熟说明了制造领域正在取得新的革命性的技术进步。这项技术的主要驱动力来源于它所固有的设计灵活性和自由度，而目前传统制造技术不容易实现这一点。然而，增材制造也确实给我们带来了新的挑战，要实现打印所需的完美产品，需要人们继续对打印材料和制造过程本身进行更加深入和全面的研究和开发^[4]。

激光3D打印正呈现技术成熟阶段。我们可以看到新的激光3D打印方法、新开发的激光光源、新的打印监控技术，新材料的开发，包括金属合金，特别是难熔合金和高反射金属、玻璃、聚合物复合材料和陶瓷，正在不断涌现。

在新激光光源中，绿光或紫外激光由于其较短波长，可以使铜、铝、金、银、铂和铱等高反射材料的激光打印更加有效和高效。超快激光以及包括激光功率、扫描速度、孵化空间、层厚度和图案化策略在内的工艺参数优化，可以制作包括耐火材料在内的各种材料的高密度样品。耐火合金具有非凡的耐热性和耐磨性以及卓越的耐用性，通常是航天器、导弹和高超音速飞行器等极端环境应用的理想材料。由于与复杂形状的制造相关的困难和高成本，即使在最苛刻的应用中，它们的使用也受到了阻碍。另一方面，增材制造或激光3D打印展示了传

统制造工艺无法实现的卓越形状生产能力。难熔金属合金的3D打印（见图10），可以大大提升零件的极端环境性能，同时降低成本。玻璃的3D打印技术为具有非常规结构和定制成分的新型玻璃结构打开了大门。LAM在空间系统和空间制造中的应用，以及在卫星制造中的应用，也成为近年来发展的亮点之一。



图10 难熔金属合金的增材制造

作为一项新兴的技术，尽管过去40年通过开发更好更快的系统、更多的材料、更多解决方案和标准列表而取得了巨大的飞跃，激光3D打印或增材制造仍然面临许多挑战。新一代增材制造专业人士正在成长起来，他们为创建全面的增材制造解决方案，正在寻找合作伙伴，以进行行业内的整合。这是一个年轻富有朝气和不断发展的行业，在今后十年将继续快速发展和演变，未来可期！

参考文献：

- [1] HELVAJIAN Henry, GU Bo. Special section guest editorial: 3-D printing and manufacturing[J]. Optical Engineering, 2018, 57 (4) , 041401.
- [2] HULL Charles W. Chuck hull invents stereolithography or 3D printing and produces the first commercial 3D printer[OL]. <http://www.historyofinformation.com/detail.php?id=3864>.
- [3] ASTM International. www.astm.org[OL].
- [4] Bo GU. New frontiers in laser 3D Printing[N]. Photonics West Show Daily, 2022. <https://optics.org/showdaily/showdaily2202.pdf>.

MW 20220212