

增减材混合制造的研究进展

果春焕, 王泽昌, 严家印, 袁 丁, 姜凤春[✉], 王建东, 牛中毅

哈尔滨工程大学材料科学与化学工程学院, 哈尔滨 150001

✉通信作者, E-mail: fengchunjiang@hrbeu.edu.cn

摘 要 增材制造可以制造通过传统方法难以制造的复杂部件, 因此在航空工业等领域中得到了大规模的应用。然而, 增材制造成形部件的尺寸和几何精度以及表面质量低于传统方法成形的部件, 阻碍了增材制造的进一步应用。增减材混合制造将增材制造与传统的加工手段结合, 对增材制造成形的部件进行高精度数控加工, 以改善部件表面光洁度以及零件的几何和尺寸精度。本文阐述了增减材混合制造的技术原理和研究进展, 并指出了未来的发展方向。

关键词 增材制造; 数控加工; 增减材混合制造; 工艺规划; 表面质量

分类号 TG65

Research progress in additive–subtractive hybrid manufacturing

GUO Chun-huan, WANG Ze-chang, YAN Jia-yin, YUAN Ding, JIANG Feng-chun[✉], WANG Jian-dong, NIU Zhong-yi

College of Material Science and Chemical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China

✉ Corresponding author, E-mail: fengchunjiang@hrbeu.edu.cn

ABSTRACT Compared with the traditional subtractive and equal manufacturing (SM/EM) computer numerical control (CNC) machining, press working, and casting, additive manufacturing (AM) technology has great advantages in the construction of high-complexity parts. Moreover, its material usage rate is high and the production cycle is short. Therefore, AM is the focus of civil aviation and defense industries, which need high-hardness metal materials and precision machining. However, the thermal history of the AM process affects the geometry of the weld pool, causing the workpiece to fail to meet tolerance requirements. Additionally, large temperature gradients and cooling rate inhomogeneity can also lead to excessive residual stress in the formed parts, which may cause deformation or even fracture of the parts. Factors such as poor dimensional and geometric precision, lower surface quality than that in conventionally formed parts, and poor uniformity of material properties hinder further application of AM. To solve the above problems, the concept of additive and subtractive hybrid manufacturing (ASHM) was developed. Additive and subtractive hybrid manufacturing combines AM with traditional machining and material reduction technology on a single work platform. It involves alternating additive and material reduction operations to improve the surface quality and the geometric and dimensional accuracy of the parts and alleviate residual stress in the parts. According to the different characteristics of an energy source for AM, this paper expounded the technical principle and research progress of ASHM based on arc, laser, and other energy sources and introduced the research progress of the ASHM process. The advantages and disadvantages of the application of this technology in the industrial field were analyzed, and the future development direction of the technology was presented. The ASHM process is expected to become more intelligent, integrated, and standardized in the future.

KEY WORDS additive manufacturing; CNC machining; additive/subtractive hybrid manufacturing; process planning; surface quality

增材制造(AM)又被称为 3D 打印,是指直接使用叠层堆积方式由计算机辅助设计(CAD)模型构建三维部件的制造工艺. 在过去 30 年中,增材制造已经适用于多种材料、尺寸的零部件制造,在多领域得到了广泛的应用. 如今通用电气(GE)、空客(Airbus)这样的工业巨头已经将 3D 打印技术推向产业化. 主流的增材制造方法包括选择性激光熔化(SLM),选择性激光烧结(SLS),熔融沉积建模(FDM),激光工程净成形(LENS),电弧增材制造(WAAM)和电子束熔化(EBM)等. 相对于传统的数控加工,压力加工与铸造等制造工艺,增材制造在复杂度较高的零件构建上有着巨大的优势;同时,其材料利用率高、成形周期较短,因此增材制造受到经常使用高硬度金属材料并需要进行精密加工的民航工业以及国防工业的重点关注. 工业界一度认为这种颠覆性的制造技术会挑战传统制造工艺的地位.

然而,随着人们对增材技术的了解越发深入,这种工艺的缺点也逐步浮现. 增材技术利用高能能量源逐点逐层熔化和凝固材料,不可避免地会在相邻层之间存在台阶效应等负面影响,导致表面质量、尺寸精度较低. 因此,增材制造的零件表面精度达不到机加工的水平,而如航空航天领域的精密部件对尺寸公差的要求十分严苛,单纯依赖增材制造构建的零件难以满足其精度要求. 此外,大规模生产情景下增材制造的生产效率低于传统工艺. AMT 的制造技术副总裁 Tim Shinbara 认为,传统加工的效率是增材制造效率的 3 倍,这是增材制造无法取代传统加工技术的重要原因^[1]. 传统工艺经过长期的发展积累已经十分成熟,除了在精度、效率、表面质量方面的优势,传统制造

产业有种类丰富、价格较低的商用机床,大量经验丰富的操作工人,统一的行业标准,这些都是增材制造难以企及的优势. 欧洲增材领域代表性企业 SLM Solutions 全球市场营销副总裁 Stefan Ritt 认为,3D 打印与传统加工方式的关系是互补而不是替代,传统加工与 3D 打印将会并存. 3D 打印将成为整个加工链的一环^[2].

增减材混合制造主要有以下优势: 1) 相对增材/减材工艺部件有更高精度、表面质量; 2) 材料利用率最高可达 97%; 3) 加工过程中工件无需移动,降低了移动带来的定位误差和碰撞事故; 4) 单一机床代替了复杂的工艺链,节省车间空间的同时更加节能环保; 5) 能加工增材制造难以成形的内部精细结构和垂悬结构; 6) 总投资较低,混合机床的价格低于整条工艺链所需的设备,且增减材工艺在混合机床中共享软硬件平台(引导系统,机床结构,数字控制(CNC)系统,用户界面). 因此,增减材制造受到了众多工业巨头的青睐. 本文将分别从基于电弧、激光以及其他能量源的增减材制造技术的研究现状和增减材制造工艺规划的研究进展来介绍增减材混合制造这门技术的最新发展现状.

1 增减材混合制造技术的国内外研究进展

1.1 增减材混合制造的技术原理

Chang 等^[3]首先提出增减材混合制造(Additive/subtractive hybrid manufacturing, ASHM)这一概念,即融合增/减材制造各自的优势,通过增材制造一层或多层后,利用铣削等减材制造方法将零件精加工至设计尺寸和形状,增减材制造交替或同步进行(如图 1 所示),以提高成形件的表面质量和

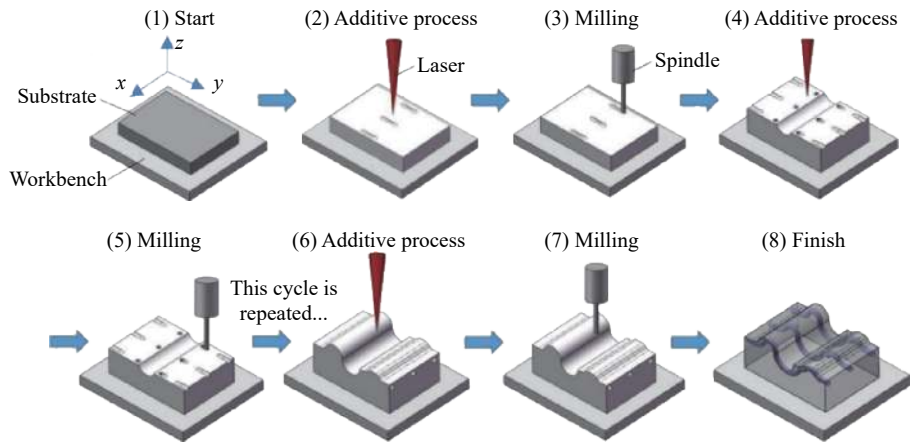


图 1 增减材混合制造原理图^[4]

Fig.1 Schematic of the ASHM process^[4]

成形效率。由于不同能量源在增材制造成形的过程中有不同的特点和适用范围, 本文将按照增材制造所利用的各种能量源, 逐类阐述电弧、激光以及其他能量源条件下增减材混合制造装备的研究进展情况。

1.2 基于不同能量源的增减材混合制造研究进展

1.2.1 以电弧为能量源的混合制造

电弧熔丝与铣削的结合是增减材混合制造最常见的形式, 即借助电弧产生的高温熔化丝材沉积一层材料后, 再对沉积层精密铣削得到平整的表面, 如此往复制得高精度零部件。

张海鸥等^[5]发明了“智能微铸锻铣混合制造”技术(如图 2 所示), 即将电弧微铸增材成形与连续微锻等材成形、铣削减材成形方法混合, 在沉积层半凝固微区对其进行同步连续微锻造来细化沉积层晶粒, 并采用数控铣削方式去除后续难加工和缺陷部分。此工艺具有流程短, 能耗低, 设备一体化、小型化的优势, 且成形零件的力学性能优于同种材料的传统锻件, 是一种新型绿色制造方法。Akula 等^[6]和 Karunakaran 等^[7]开发了一种搭载了 CNC 铣削和熔化极气体保护焊(GMAW)两种工艺的混合机床及基于 PLC 的机床控制系统。混合加工中沉积与铣削交替进行, 一旦达到近净形状, 就进行精铣削以完成零件。在测试了成形件性能后, 发现该方法制造的零件虽在机械性能上不如传统方式制造的零件, 但几何精度在 CNC 铣削之后可达 ± 0.030 mm。该团队也分析了沉积参数在增减材混合制造中的影响, 发现了材料微观结构随沉积参数的变化规律, 以及结构零部件在增材过程由于升降温不均匀产生了变形。

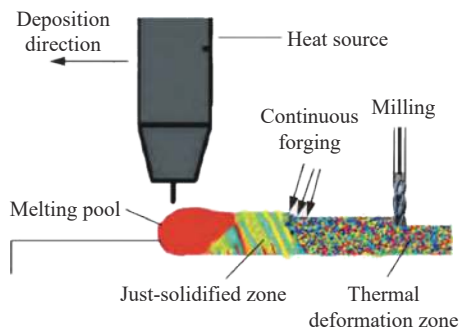


图 2 智能微铸锻铣混合制造原理图^[5]

Fig.2 Principle of smart micro-casting, forging, and milling^[5]

Karunakaran 等^[7]和 Sreenathbabu 等^[8]提出一种基于电弧熔丝的电弧混合叠层制造工艺(ArcHybrid-layered manufacturing, ArcHLM), 在每道沉积层完成后进行 CNC 端面铣削处理, 得到的

光洁表面有利于良好的层间结合。为避免在制造过程中升降增材喷嘴时发生碰撞, 在混合机床配备了气动制动器; 焊接电源安装在机床的保护板内。对于增减材混合加工中冷却这一难点问题, 则采用带有 Z 字形冷却管的多孔夹具来改善沉积与机加工过程中的散热(如图 3)。ArcHLM 工艺在制造金属刀具和模具时能节省大量的时间和成本, 更重要的是将增材制造和精加工整合到单一平台上进行统一控制, 可以说是增减材混合加工机床开发最早的尝试之一。

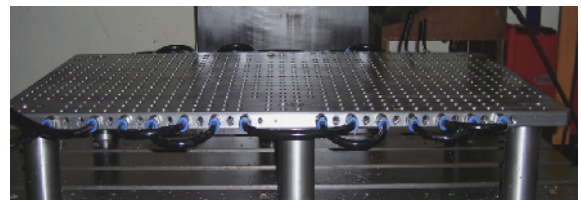


图 3 ArcHLM 工艺采用的带有冷却管的夹具^[7]

Fig.3 Universal fixture with coolant ducts used by ArcHLM^[7]

Song 等^[9]将两个 GMAW 焊枪集成在 3 轴机床的主轴旁, 交替进行沉积和铣削操作, 得到致密度在 90% 以上的零部件, 铣削后的部件表面粗糙度(Ra)达 $2\text{ }\mu\text{m}$, 拉伸强度与低碳钢丝相当。Song 等^[10]还使用该设备制造了多材料零件, 即用两个增材喷嘴分别沉积不同的材料, 将低碳钢芯包裹在不锈钢外壳内, 得到了强度高、韧性好的组合零件, 两种材料可以在电镜下观察到明显的界面。

目前基于电弧的增减材混合制造普遍采用 3 轴或 5 轴机床或机器人作为运动平台, 搭载改装的焊接设备沉积材料。为避免焊枪阻碍 CNC 加工操作, 一部分设备为焊枪增加了伸缩功能。这类工艺通常只对沉积层顶面铣削, 缺少对层间轮廓铣削的尝试, 因此制造出的零部件结构相对简单, 没有悬垂和内部精细结构。

1.2.2 以激光为能量源的混合制造

在主要的增材制造工艺中, 电弧增材制造的零部件存在精度差与变形的缺陷, 且使用电导率低下的丝材时沉积效果差, 这些局限性使研究人员将目光转向了激光。

Kerschbaumer 和 Ernst^[11]报道了一种激光熔覆和 CNC 混合加工系统, 将 Nd: YAG 激光熔覆头和送粉系统集成到商用 Rödgers 5 轴数控机床中, 5 轴机床允许在多个构建方向上沉积材料, 避免熔融材料沿倾斜表面流动, 同时显著降低对支撑结构的要求; 5 轴机床的灵活性还使得减材过程中刀具可加工区域增多。该研究发现, 在交替激光熔覆和

切削操作中,由于粉末原材料对熔覆环境要求严苛,在加工过程中无法使用切削液,成形效率大打折扣。

Jeng 和 Lin^[12] 使用选择性激光熔覆(SLC)和铣削混合工艺制造了金属快速原型和模具。利用激光直接熔化喷嘴喷出的金属粉末形成熔覆层,再对熔覆层的顶部和侧面进行铣削以达到预期的精度。对完成的模具注塑,结果表明模具的几何精度和致密度良好。

利用选区激光熔化(SLM)在金属增材部件上构建精细垂悬结构是一大难点。精细外部结构太脆弱,无法承受下一层粉末的冲击,传统的减材工艺也很难处理这种类型的特征。为解决这一问题,Yasa 等^[13] 采用独特的混合制造工艺,即在选区激光熔化设备上,以两种不同模式运行 Nd: YAG 激光器,以执行两种不同的制造工艺。第一种是增材 SLM 工艺,此时激光器以连续模式工作;第二种工艺是选区激光侵蚀(SLE),利用脉冲模式的激光在 SLM 工艺之后去除工件多余材料。研究表明,结合 SLM 和 SLE 可有效改善 SLM 部件的表面粗糙度,同时改善部件的孔隙率。此外,与 SLE 相结合提高了 SLM 的精细加工能力,可以构建尺寸在 50 ~ 100 μm 范围内的内外精细结构。这项研究仅通过参数变化,重新进行机床配置即可实现混合加工方式,这提醒了研究者,混合加工并不只是将不同工艺的硬件模块组合在一起,一台设备不经改装也可能通过不同的加工方式实现混合加工。

Du 等^[4] 和白倩等^[14] 结合选区激光熔化(SLM)与精密铣削技术,以 18Ni 马氏体钢为原料进行了增减材混合制造,制备出性能、精度、表面质量均优于由锻造与增材制造方法制造的零件。他们发现,与增材零件相比,经过铣削后的零件在凝固过程中引入的残余应力较小。李青宇等^[15] 设计并搭建了国内首台高校自制五轴激光熔覆与铣削增减材混合设备,并且成功完成了金属零件的制造、加工和修复工作。中南大学粉末冶金研究院采用国内首台增减材混合加工中心 DMG MORI LASERTEC 65 3D 完成了不锈钢粉末的增减材制造,制造过程中结合了激光沉积工艺与 5 轴数控铣削,得到的零件力学性能与锻件相当,并成功实现了异性涡轮增压壳体等复杂形状零件的精密制造^[15-16]。

磨削也可以成为混合加工的一部分,如 Löber 等^[17] 利用磨削将 316L 不锈钢增材部件的表面粗糙度由 15 μm 降低至 0.34 μm 。Rossi 等^[18] 报

道,经过磨削处理后,Ni-Fe-Cu 部件在水平表面上的表面粗糙度从 12 μm 减小到 4 μm ,在垂直表面从 15 μm 减小到 13 μm 。增材零件复杂的几何形状对传统磨削提出了挑战。为了应对这种挑战,Beauchamp 等^[19] 使用形状自适应磨削来对 Ti6Al4V 金属增材制造零件后处理,该工艺使用三种不同的金刚石磨粒磨削零件表面,获得 10 nm 的表面粗糙度。

Sitthi-Amorn 等^[20] 开发了名为 MULTIFAB 的增减材混合制造设备,其主体是一个用于材料沉积的机械臂,可以被集成到另一个 5 轴机床中。该系统适用于电弧和激光、等离子等能量源的能量直接沉积(DED)工艺。主要功能为工件扫描建模,通过对工件几何形状进行逆向工程,实现高价值金属部件的维修。

目前,基于激光的混合制造占据了混合制造的主流位置。由于激光能量源具有高度可控的特点,与减材技术结合后可以制造精度最高、形状最复杂的零部件,因此已被一些企业应用于精密零件的维修。众多知名机床制造商如 Hermle、Mazak 等也相继研发出大量基于激光的增减材混合机床。但激光混合制造也存在一些问题,如:理论上激光可以用于大多数金属材料的增材制造,但是高反射率的材料能量吸收效率较低;切削液在激光熔覆过程中难以使用,缺乏有效的散热手段将会影响加工效率等。

1.2.3 基于其他能量源的混合制造

Xiong 等^[21] 提出一种混合等离子体沉积和铣削(HPDM)工艺(如图 4 所示),即利用等离子弧熔融粉末完成一道沉积层时,在其顶部进行平面铣削加工,获得具有一定厚度的光滑表面,以便进一步沉积,内外表面轮廓采用 T 型槽铣刀轮廓铣削加工,去除表面残余的阶梯,获得近净形金属部件的精细表面质量。由 HPDM 制造普通三轴机床难

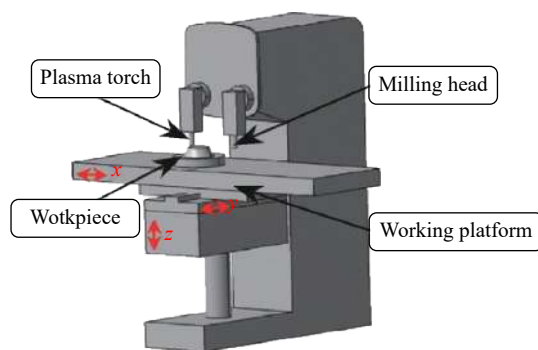


图 4 等离子沉积铣削工艺示意图^[21]

Fig.4 Schematic of the HPDM process^[21]

以制造的扭转叶片, 经过渗透探伤检测, 发现表面无裂纹、孔隙或缺陷. 该工艺在无润滑液和冷却液的条件下进行高温干铣, 导致刀具、工件和废料之间的摩擦力迅速增加, 切削力的增加导致切削能快速增加, 工作区域温度升高, 大大缩短了刀片寿命. 研究表明, 采用风冷降温能显著减少刀具磨损, 延长刀具寿命.

Zhu 等^[22]整合了熔融沉积成形(FDM)、CNC 铣削、检测装置, 在单一平台上以热塑性塑料为原料制造零部件, 成形过程中部件发生了变形和质量降低. 这是由于制造过程中部件被分解为逐个构建的多个子部件进而组合, 沉积的新子部件(205 ℃)与先前制造子部件(20 ℃)之间的温差引起残余应力, 导致部件变形. 该课题组后续将建立有限元分析(FEA)模型, 期望根据不同的沉积模式和刀具路径模拟 3D 瞬态热传导和对流, 预测变形程度和零件公差. 这项研究对于混合制造这种新兴工艺的优化至关重要.

Fabrisonic 公司的超声增材制造技术(UAM)是一种独特的金属增材制造技术^[23]. UAM 技术中使用超声波去熔融用普通金属薄片拉出的金属层, 从而完成金属部件的增材制造. 该方法能够实现真正冶金学意义上的粘合, 并可以使用各种金属材料, 如铝、铜、不锈钢和钛等. Fabrisonic 的方法可以同时“打印”多金属材料, 该工艺能够使用成卷的铝或铜质金属箔片制造出带有高度复杂内部通道的金属部件. UAM 的制造过程为, 使用频率高达 20 kHz 的超声波施加在金属片上, 用超声波的振荡能量使两个需焊接的表面摩擦, 构成分子层间的熔合, 然后以同样的原理逐层连续焊接金属片. 之后, 通过机械加工来实现精细的 3D 形状, 从而形成坚实的金属物体.

冷喷涂是一种独特的增材制造工艺, 利用高压气体将极细的粉末材料以超音速喷射到基板或目标工件表面, 颗粒与零件表面扩散结合, 以修复或成形零件. 这种工艺无需熔化金属, 从而避免了热应力与亚稳相的引入. 但冷喷涂生产的复合材料涂层由于过分的弥散强化丧失了大部分延展性, 这是由于增强颗粒分布不均以及涂层与基材之间存在明显的界面. Peat 等^[24]为改善这一问题, 研究了冷喷涂与搅拌摩擦处理相结合的工艺. 研究表明, 搅拌摩擦处理产生的剪切力大幅细化了增强颗粒, 其分布更加均匀. 此外, 晶界偏聚物也在处理后分散. 处理后的涂层硬度增加了 120%, 抗腐蚀性能也大幅改善. Courbon 等^[25]对冷喷涂

的钛合金涂层进行球磨处理, 结果表明, 涂层表面的拉应力变为压应力.

在上述混合制造技术中, 等离子弧的优缺点与电弧相近, 此处不再赘述; 熔融沉积成形是塑料增材制造的主要工艺之一, 但在使用强韧性较低的材料时易出现断丝现象; 超声波增材制造受限于功率, 只能用于厚度较小的箔材, 对厚板或高强度材料固结效果不理想; 冷喷涂工艺由于其众多优势, 近年来得到了广泛的研究与应用, 该技术能完成陶瓷、高分子、金属等多种材料的喷涂, 冷喷涂与减材技术结合, 将成为一种极具前景的混合制造技术, 对国防与航天领域的涂层制备至关重要.

1.3 增减材混合制造的工艺规划

工艺规划是指从识别、切分部件模型到生成加工序列, 确定刀具路径、工艺参数的工艺设计方法. 增减材混合制造与传统的减材技术在工艺规划上有很大的差别. 首先, 在减材过程中, 利用刀具减去整块坯料上多余的材料, 直至达到目标形状和尺寸. 如果零件的形状比较复杂, 通过减材技术加工出零件的各种特征不仅材料浪费多、耗时长, 其刀具可达性也限制了减材零件的复杂程度. 在细长杆刀具加工具有弯曲、狭窄空腔特征的零件(例如叶轮)时, 刀具和特征很可能会发生碰撞, 该问题也限制了刀具的选择, 并影响刀具对齐的平滑性. 但是, 增减材混合制造在基板上先进行增材操作, 随后再通过减材操作去除多余材料, 通过合理的序列和路径优化, 其刀具碰撞的可能性大大降低, 因此可以加工复杂度更高的零件. 传统的增材和减材工艺规划通常是一个单调的过程, 每一步增材/减材的操作都会使工件在尺寸和形状上更接近目标状态. 在这一过程中, 工件在中间状态下的大小会持续增加/减小, 而不会回到上一步操作的状态, 在满足目标状态后程序即终止. 而增减材混合制造的工艺规划不同, 增材与减材交替进行, 工件的大小可能会变大或变小; 与单向增/减材料的工艺规划相比, 混合制造的工艺规划可能会出现反复添加和减去相同材料的周期, 并可能无休止地循环^[26].

工艺规划会从多方面影响成形件的性能、尺寸精度和几何精度. 首先是模型文件的切片策略: 分层厚度越小, 成形工件的精度和表面精度越好, 总体成形时间越长. 其次是工艺参数的选择: 能量源的功率和成形速度决定了热历史, 热历史会影响熔池的几何形状, 而熔池形状过大或过小都会

使成型零件的几何精度降低, 导致工件无法满足公差要求。另外, 冷却过程中, 过大的温度梯度和工件不同位置的冷速差异也会导致成形部件中残余应力过大, 可能会导致零件变形甚至断裂。因此, 根据零件形状和材料选择合理的工艺参数, 是保证零件性能和几何、尺寸精度的关键。

另外, 零件修复与新零件制造在工艺规划方面有不同的侧重点: 零件修复过程需要首先对破损部位进行三维扫描, 测量尺寸并特征化零件结构, 逆向工程生成模型, 随后在修复的过程中根据监测结果进行工艺参数与增减材操作的实时调整, 确保修复部分的尺寸、形状与性能接近原部件。此过程中, 最重要的步骤是建立准确损坏部分模型。新零件制造更加强调切片策略, 将复杂零件分解成层片或子部件, 确定子部件的建造方向, 建立并优化增减材操作的序列。此过程中, 关键步骤是合理的切片策略与操作序列的优化, 要兼顾避免刀具与特征碰撞、可加工性、特征支撑、节约时间与材料等关键问题。本节将以切片策略、扫描建模与实时监测、效能评估为侧重点介绍增减材混合制造工艺规划的研究进展。

为了优化制造资源、节省时间并最小化几何复杂性, 增减材混合制造有必要开发部件分解算法, 采取最佳工艺规划和决策。以修复操作为例, Eiamsa-Ard 等^[27]设计了以混合工艺修复零件的 4 个主要工艺规划步骤: (1) 确定磨损/损坏的结构; (2) 生成移除损坏/磨损结构的加工刀具路径; (3) 生成修复磨损/损坏的过程的沉积刀具路径; (4) 将刀具路径后处理成加工代码。

Le 等^[28]基于以上思路提出一种新的成形策略, 将输入的 3D 模型与损坏工件部件特征细分为增材特征与机加工特征, 然后合理规划增材、减材、检查三种操作的序列, 最终实现零件的维修与再制造。Kulkarni^[29]使用零件 STL 文件的等间距平面切片来识别逐层过程计划和刀具路径的方法被称为“零阶”边缘近似。为了减小阶梯效应, 算法将原始厚切片进一步分解成精细切片, 以将部件几何形状表示为适当的精度。Karunakuran^[7]也使用零阶边缘近似来计算切片厚度和零件设计的分层, 在每一层中沿 Z 字形或螺旋方向构建材料。对每个沉积层进行面铣, 以统一沉积层的高度并去除表面缺陷。

等间距切片策略经过优化后诞生了自适应切片策略。Zhang 和 Liou^[30]改变了切片的方向, 以减少悬垂几何形状对支撑结构的依赖性。该算法先

计算出最佳切片方向, 然后检查刀具可访问性。Ruan 等^[31]通过引入非均匀层构建进一步推进了这项工作, 每一点的层厚度都随位置变化。他们将构建过程分为两个阶段(如图 5 所示), 沉积具有恒定厚度的均匀层(等厚层), 然后切削掉多余材料形成非均匀层, 该层顶面垂直于算法计算出的下一层的优选构建方向。

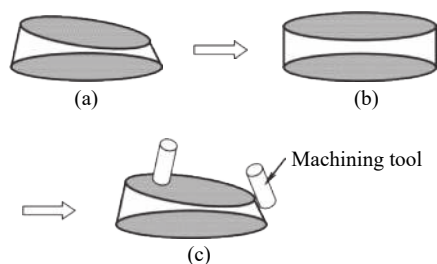


图 5 非均匀层构建策略示意图^[31]。(a)非均匀层;(b)等厚层;(c)加工成等厚层

Fig.5 Schematic of non-uniform-layer construction strategy^[31]: (a) non-uniform thickness layer; (b) uniform thickness layer; (c) machining process to form uniform thickness layer

Kerbrat 等^[32]提出了用于部件划分的混合和模块化方法, 以提高现有模型的可制造性; 并基于 CAD 模型的八叉树分解开发了可制造性指数计算软件, 以比较原始模型和修改后模型的制造难度。Chang 等^[3]通过识别增材构建中的底切、非底切和非单调表面来分解零件, 然后使用图论来识别最小构建序列。此外, 他们在设计序列时还考虑到了避免切削刀具与现有零件结构之间的干涉。Joshi 和 Anand^[33]开发出增减材零件分割算法和工艺决策方法, 由算法生成的工艺计划大幅减少了几何复杂性, 优化了制造资源。此外, 定义了一种称为复杂性得分的新指标, 还开发了基于制造设计 (DFM) 规则的参数量化零件几何复杂度的方法。他们提出的方法有助于在实际制造产品之前, 检测潜在的制造困难, 并确定制造的最佳制造工艺。Ren 等^[34]开发了一种工艺规划方法, 能够分解零件并为 CNC 加工和激光沉积生成不均匀的层厚度和刀具路径。

Manogharan 等^[35]开发出了一种名为 AIMS 的混合制造系统, 结合数字减影技术对沉积层的尺寸偏差实时检测, 并同步调整增减材操作的刀具路径以修正沉积层的几何形状。Newman 等^[36]和 Zhu 等^[37]开发出名为 iAtractive 的工艺规划系统, 包括在单一平台上集成增材、减材工艺和监测手段, 该系统用于现有零件再利用和再制造。回收和遗留的零件也能被重新制作成新零件, 且其新功

能与原始零件不同. 部件的再制造主要通过适当地对增减材工艺进行排序来实现. 通过扫描获取的现有部件的几何信息, 根据生成的工艺计划连续增加/减少材料.

Ranjan 等^[38-39]提出了“生产能力指数”概念, 用于比较通过增材制造的不同零件设计. Lutter-Günther 等^[40]分析了混合制造技术的成本和资源投入, 建立了混合增材工艺的成本模型, 该模型能够分析给定部件的制造成本结构以及混合制造机床操作的资源投入.

可以发现, 现有的增减材工艺规划研究主要侧重于模型分层策略的改进、零件可加工性的评估与增减材工艺工序设计方面, 但是从工业应用的角度来看, 增减材混合制造更需要一套实时的检测反馈调节系统, 以及配套的完整的闭环控制系统. 闭环控制的关键是加工之后的检测步骤, 但如何将渗透测量技术不受影响地整合到混合机床中是一大难点. 此外, 工艺参数之间复杂的关联性也增加了闭环控制的难度.

2 结束语与展望

增减材混合制造解决了增材制造中部分异形零件难以加工的问题, 相比传统的工艺流程大幅降低了成本, 改善了增材制造的成形精度与表面质量, 并且还降低了凝固过程中引入的残余应力, 在模具、医疗、航空航天、国防领域具有广阔的应用前景. 这门新兴的技术虽然有着很好的应用前景, 但是目前仍然存在一些问题阻碍其大规模应用. 增减材混合制造未来需要解决的重点技术问题如下:

(1) 机床冷却系统. 残留在沉积层的冷却液蒸发会形成孔隙, 影响沉积层的层间结合和力学性能; 而加工后自然冷却会影响制造的效率. 增减材混合制造仍然需要可靠的冷却系统应对增材制造与机加工过程产生的热量.

(2) 机床保护. 增材制造所用粉末颗粒直径小, 如果机床密封不到位, 粉末会污染引导系统干扰其平稳运动, 而且会影响机床中的定位编码器. 当处理高反射率材料(如铝, 铜)时, 激光束的反射可能导致防护装置或其他敏感元件特定区域熔化, 需要保护装置.

(3) 增材制造部分仍需建立行业标准. 传统数控加工行业中, 主轴、刀具接口、控制系统等, 都建立在统一标准之上, 但增减材制造领域目前缺乏统一行业标准, 这样的标准建立需要漫长的时间.

(4) 工艺规划. 对于形状较为复杂的零件, 由于层与层之间复杂的空间关系, 工序往往需要资深工程师人为修正. 为了提高成形效率与精度, 需要开发更加智能、可靠的自动模型切分与工艺规划系统.

(5) 可靠的实时检测手段与反馈调节系统. 为了精准控制增减材工艺中工件的几何形状, 需要对熔池与沉积层进行实时的成分与外形检测, 以确定减材精加工需要去除的材料量. 检测设备将信号反馈给 NC 系统后, 需要准确、实时调节电源功率, 送料速度等工艺参数. 考虑到热力场模拟需要消耗的资源较大, 增减材混合制造需要大量实验来建立类似于 GTAW 的经验数据库.

增减材混合制造结合了两种工艺的优点, 是一种高效、高精度的先进制造技术. 相信随着以上技术难题的解决, 这门新兴技术会成为多行业、多领域中生产和修复复杂零件的重要技术.

参 考 文 献

- [1] Saunders S. Free 3D systems whitepaper discusses scalable, digital molding process and figure 43D printing[EB/OL]. 3DR Holdings (2018-09-27)[2020-03-23]. <https://3dprint.com/225981/digital-molding-whitepaper/>
- [2] Ritt S. Trends in metal additive manufacturing: fast and big [EB/OL]. WTW Media (2013-12-09)[2020-03-23]. <https://www.makepartsfast.com/trends-metal-additive-manufacturing-fast-big/>
- [3] Chang Y C, Pinilla J M, Kao J H, et al. Automated layer decomposition for additive/subtractive solid freeform fabrication // 1999 International Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, 1999: 111
- [4] Du W, Bai Q, Zhang B. A novel method for additive/subtractive hybrid manufacturing of metallic parts. *Procedia Manuf*, 2016, 5: 1018
- [5] Zhang H O, Huang C, Li R S, et al. A super short-process green manufacturing method and energy consumption analysis of micro casting forging and milling for high performance parts. *China Mech Eng*, 2018, 29(21): 2553
(张海鸥, 黄丞, 李润声, 等. 高端金属零件微铸锻铣复合超短流程绿色制造方法及其能耗分析. 中国机械工程, 2018, 29(21): 2553)
- [6] Akula S, Karunakaran K P. Hybrid adaptive layer manufacturing: an intelligent art of direct metal rapid tooling process. *Robot Comput-Integr Manuf*, 2006, 22(2): 113
- [7] Karunakaran K P, Suryakumar S, Pushpa V, et al. Retrofitment of a CNC machine for hybrid layered manufacturing. *Int J Adv Manuf Technol*, 2009, 45(7): 690

- [8] Sreenathbabu A, Karunakaran K P, Amarnath C. Statistical process design for hybrid adaptive layer manufacturing. *Rapid Prototyping J*, 2005, 11(4): 235
- [9] Song Y A, Park S, Choi D, et al. 3D welding and milling: Part I-a direct approach for freeform fabrication of metallic prototypes. *Int J Mach Tools Manuf*, 2005, 45(9): 1057
- [10] Song Y A, Park S, Chae S W. 3D welding and milling: Part II - Optimization of the 3D welding process using an experimental design approach. *Int J Mach Tools Manuf*, 2005, 45(9): 1063
- [11] Kerschbaumer M, Ernst G. Hybrid manufacturing process for rapid high performance tooling combining high speed milling and laser cladding // *Proceedings of the 23rd International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*. Orlando, 2004: 1710
- [12] Jeng J Y, Lin M C. Mold fabrication and modification using hybrid processes of selective laser cladding and milling. *J Mater Process Technol*, 2001, 110(1): 98
- [13] Yasa E, Kruth J P, Deckers J. Manufacturing by combining selective laser melting and selective laser erosion/laser re-melting. *CIRP Annals*, 2011, 60(1): 263
- [14] Bai Q, Dong Z G, Yan Y, et al. Development of additive / subtractive hybrid manufacturing practical teaching platform for full-time master of engineering students. *Lab Sci*, 2018, 21(2): 158
(白倩, 董志刚, 闫英, 等. 金属增减材复合制造专业硕士实践教学平台建设. 实验室科学, 2018, 21(2): 158)
- [15] Li Q Y, Li D C, Zhang A F, et al. Development and challenges of laser cladding deposition and machining composite manufacturing technology // *Proceedings of the 17th National Special Processing Conference (Abstract)*. Guangzhou, 2017: 194
(李青宇, 李涤尘, 张安峰, 等. 激光熔覆沉积与切削加工复合制造技术的发展与挑战// 第17届全国特种加工学术会议论文集(摘要). 广州, 2017: 194)
- [16] Zhang J T, Zhang W, Li Y J, et al. Laser deposition additive/subtractive hybrid manufacturing process for stainless steel powder based on DMG MORI LASERTEC 653D. *Mater Sci Eng Powder Metall*, 2018, 23(4): 368
(张军涛, 张伟, 李宇佳, 等. 基于DMG MORI LASERTEC 653D加工中心的不锈钢粉末激光沉积增/减材复合制造. 粉末冶金材料科学与工程, 2018, 23(4): 368)
- [17] Löber L, Flache C, Petters R, et al. Comparison of different post processing technologies for SLM generated 316L steel parts. *Rapid Prototyping J*, 2013, 19(3): 173
- [18] Rossi S, Deflorian F, Venturini F. Improvement of surface finishing and corrosion resistance of prototypes produced by direct metal laser sintering. *J Mater Process Technol*, 2004, 148(3): 301
- [19] Beaucamp A T, Namba Y, Charlton P, et al. Finishing of additively manufactured titanium alloy by shape adaptive grinding (SAG). *Surf Topography: Metrology Prop*, 2015, 3(2): 024001
- [20] Sitthi-Amorn P, Ramos J E, Wang Y, et al. MultiFab: a machine vision assisted platform for multi-material 3D printing. *ACM Trans Graph*, 2015, 34(4): 129
- [21] Xiong X H, Zhang H O, Wang G L. Metal direct prototyping by using hybrid plasma deposition and milling. *J Mater Process Technol*, 2009, 209(1): 124
- [22] Zhu Z, Dhokia V G, Nassehi A, et al. A review of hybrid manufacturing processes - State of the art and future perspectives. *Int J Comput Integr Manuf*, 2013, 26(7): 596
- [23] Hehr A, Wenning J, Terrani K, et al. Five-axis ultrasonic additive manufacturing for nuclear component manufacture. *JOM*, 2017, 69(3): 485
- [24] Peat T, Galloway A, Toumpis A, et al. The erosion performance of cold spray deposited metal matrix composite coatings with subsequent friction stir processing. *Appl Surf Sci*, 2017, 396: 1635
- [25] Courbon C, Sova A, Valiorgue F, et al. Near surface transformations of stainless steel cold spray and laser cladding deposits after turning and ball-burnishing. *Surf Coat Technol*, 2019, 371: 235
- [26] Flynn J M, Shokrani A, Newman S T, et al. Hybrid additive and subtractive machine tools-Research and industrial developments. *Int J Mach Tools Manuf*, 2016, 101: 79
- [27] Eiamsa-Ard K, Nair H J, Ren L, et al. Part repair using a hybrid manufacturing system // *Proceedings of the Sixteenth Annual Solid Freeform Fabrication Symposium*. Austin, 2005: 1
- [28] Le V T, Paris H, Mandil G. Process planning for combined additive and subtractive manufacturing technologies in a remanufacturing context. *J Manuf Syst*, 2017, 44: 243
- [29] Kulkarni P, Marsan A, Dutta D. A review of process planning techniques in layered manufacturing. *Rapid Prototyping J*, 2000, 6(1): 18
- [30] Zhang J, Liou F. Adaptive slicing for a multi-axis laser aided manufacturing process. *J Mech Des*, 2004, 126(2): 254
- [31] Ruan J Z, Zhang J, Liou F. Selection of part orientation for multi-axis hybrid manufacturing process // *ASME 2009 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. San Diego, 2010: 587
- [32] Kerbrat O, Mognol P, Hascoët J Y. A new DFM approach to combine machining and additive manufacturing. *Comput Ind*, 2011, 62(7): 684
- [33] Joshi A, Anand S. Geometric complexity based process selection for hybrid manufacturing. *Procedia Manuf*, 2017, 10: 578
- [34] Ren L, Eiamsa-ard K, Ruan J Z, et al. Part repairing using a hybrid manufacturing system// *ASME 2007 International Manufacturing Science and Engineering Conference*. Atlanta, 2007: MSE2007-31003

- [35] Manogharan G, Wysk R, Harrysson O, et al. AIMS - a metal additive-hybrid manufacturing system: system architecture and attributes. *Procedia Manuf*, 2015, 1: 273
- [36] Newman S T, Zhu Z C, Dhokia V, et al. Process planning for additive and subtractive manufacturing technologies. *CIRP Annals*, 2015, 64(1): 467
- [37] Zhu Z C, Dhokia V, Newman S T. The development of a novel process planning algorithm for an unconstrained hybrid manufacturing process. *J Manuf Processes*, 2013, 15(4): 404
- [38] Ranjan R, Samant R, Anand S. Design for manufacturability in additive manufacturing using a graph based approach // *ASME 2015 International Manufacturing Science and Engineering Conference*. Charlotte, 2015: MSEC2015-9448
- [39] Ranjan R, Samant R, Anand S. Integration of design for manufacturing methods with topology optimization in additive manufacturing. *J Manuf Sci Eng*, 2017, 139(6): 061007
- [40] Lutter-Günther M, Wagner S, Seidel C, et al. Economic and ecological evaluation of hybrid additive manufacturing technologies based on the combination of laser metal deposition and CNC machining. *Appl Mech Mater*, 2015, 805: 213