

增减材复合加工的关键技术与发展

■ 厦门大学航空航天学院（福建 361005） 董一巍 赵 奇 李晓琳

摘要：本文详细介绍了现有的增减材复合加工技术的发展现状，并从硬件、软件、控制系统的集成三个方面对增减材复合加工技术的技术原理进行了阐述。最后基于现有复合加工技术的缺陷，指出了未来的研究重点与发展方向。



厦门大学航空航天学院/厦门大学深圳研究院 董一巍

数控加工（减材制造）与增材制造的优缺点具有很强的互补关系，如图1所示。数控加工属于“减材加工”，将数控加工与增材制造进行有机集成，以实现增减材制造工艺的复合，不仅能够提高生产效率，降低生产成本，拓宽产品原料加工范围，还可以减少生产过程中切削液的使用，保护环境。尤其是对于经常使用高硬度复合金属材料、机密加工的民航工业以及国防工业，增减材复合加工技术的推广与应用将促使相关产业迎来进一步的飞跃，必将是下一步制造业关注的重点与热点。

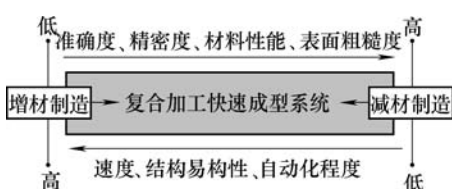


图1 增减材制造的优缺点互补关系

增减材复合制造的原理与方法

增减材复合加工技术是一种将产品设计、软件控制以及增材制造与减材制造相结合的新技术。借助于计算机生成的CAD模型，并将其按一定的厚度分层，从而将零件的三维数据信息转换为一系列的二维或三维轮廓几何信息，层面几何信息融合沉积参数和机加工参数生成增材制造加工路径数控代码，最终成型三维实体零件。然后针对成形的三维的实体零件进行测量与特征提取，并与CAD模型进行对照寻找误差区域后，基于减材制造，对零件进行进一步加工修正，直至满足产品设计要求，基本流程如图2所示。由此在同一台机床上

可实现“加法”的加工，是现有的数控切削加工和3D打印组合的混合型方案。这样，对于传统切削加工无法实现的特殊几何构型或特殊材料的零件，近净成形的阶段可由增材制造承担，而后期的精加工与表面处理，则由传统的减材加工承担。由于在同一台机床上完成所有加工工序，不仅避免了原本在多平台加工时工件的夹持与取放所带来的误差积累，提高制造精度与生产效率，同时也节省了车间空间，降低制造成本。

增减材复合制造的主要关键技术

从复合加工技术的原理可以看出，该技术的实质是CAD软

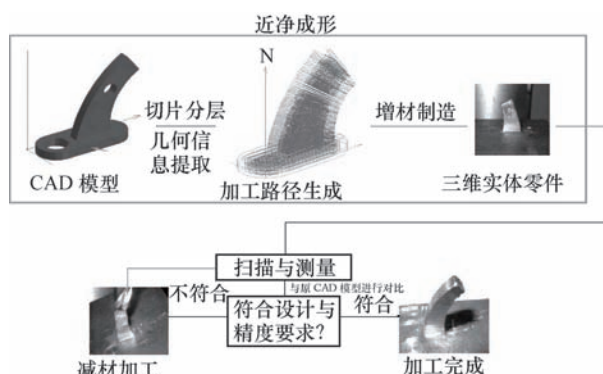


图2 增减材复合加工原理

件驱动下的三维堆积和机加工过程。因此，一个基本的复合加工系统应该由以下几个部分组成：CNC加工中心、沉积制造部分、送料系统、软件控制系统以及辅助系统。其中涉及到的关键技术主要包括复合加工的集成方式、软硬件平台搭建和复合制造控制系统。

1. 复合制造工艺集成方式

(1) 基于直接能量沉积的复合加工集成。直接能量沉积 (Directed Energy Deposition, DED) 技术的原理为使用喷嘴将不同原材料推送至熔池，使用聚集的热源将材料熔融后一层一层沉积在基板上，进而成形，如图3所示。目前对于金属的增材制造以及增减材复合加工的集成，DED技术的应用占了主导地位。

DMG Mori Seiki公司最新推出了一款LASERTEC 65 3D复合加工机床 (见图4a)，它集成了激光熔覆 (laser cladding) 技术以及5轴数控加工技术，可实现不同材料，如不锈钢、钛合金、铝合金及镍基合金等的复合加工。

Hamuel Reichenbacher公司推出了HYBRID HSTM 1500机床 (见图4b)，其设计重点是用于高价值部件的修复，集成了高速铣削/直接能量熔融 (DED)、检

测、去毛刺与抛光等辅助工艺。

Mazak公司推出了代号为INTEGREX i-400AM多功能机床 (见图4c)，其特点是它集成了两个Ambit激光熔融头，一粗一细，可分别负责高速熔融以及高精度熔融。它以一个5轴多功能加工中心为平台，用户可以利用它对增材制造的部件进行车铣与激光标刻。

(2) 基于冷喷涂的增减材复合加工集成。冷喷涂技术 (Cold Spraying) 基本原理为赋予粉末

状原材料足够的初速度，并将其喷射到基盘上造成不同材料之间的粘连，层层累计并达到零件的最终成型，如图5所示。

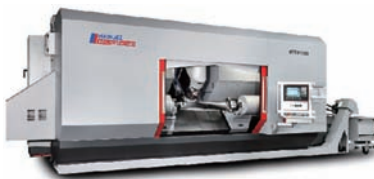
目前对于冷喷涂技术中关于粒子临界速度、涂层质量的影响因素，以及涂层沉积机制等机理尚未明晰，冷喷涂技术仍在发展中，商业化应用尚未普及。

(3) 基于粉末熔融的增减材复合加工。粉床熔融技术 (Powder Bed Fusion, PBD) 的原理为在准备好的基板上一层一层铺设材料粉末薄层，每铺一层，聚集的热源会根据成型件的几何结构在每一层特定的区域对材料进行熔融，紧接着铺设下一层材料，重复上述步骤，层层累积，直至部件最终成型，如图6所示。

Matsuura公司的Lumex Avence-25机床 (见图7) 将激光烧结技术与数控铣床集成在一个机床中。它省去了模具生产过程中的分模步骤，从而简化了制造工序。同时它也引入了复杂模具内部造型，例如涡轮叶片冷却通道的直接加工。区别于其它已经商业化的机床，它采用为3轴数控机床，自由度较低。为了解决低自由度带来的在铣削加工刀具干涉问题，在每一层材料熔融完毕后，机床都会切换到减材加工程



(a) LASERTEC 65 3D



(b) HYBRID HSTM 1500



(c) INTEGREX i-400AM

图4 已经商用化的格式机床

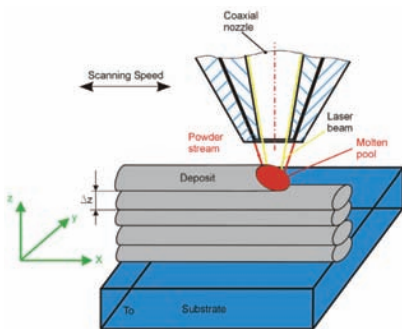


图3 直接能量熔融技术原理图

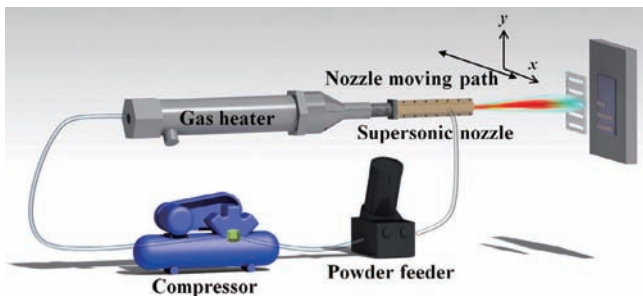


图5 冷喷涂的基本实验装置

序对内部特征区域进行预加工。
增材制造与减材加工随着逐层的沉积交替运行，保证了加工完成后工件的表面完整性。

(4) 基于材料喷射成形技术的增减材复合加工。材料喷射 (Material Jetting) 技术的原理是利用类似打印机的墨水喷嘴将液化的原材料 (例如蜡、光聚合物) 按照特定的图形喷射在基板上，待材料由液态变相为固态后，在原来已沉积好的材料上按照另外的图形继续喷射下一层材料，层层累积直至成型。

Stratasys公司推出了一系列基于PolyJet™技术3D打印产品，主要应用于光敏聚合物。工作时，喷嘴在XY平面进行移动并喷射聚合物材料，喷射完成后紧接着紫外线会对材料进行照射加速材料固化，待材料完全固化后工作承托平台会在Z方向降低一个涂层的距离，进行下一层材料的喷射沉积制造 (见图8)。

2. 复合制造机床软硬件平台

针对增减材加工工艺进行的软硬系统有机集成，可实现对待加工零件高效率、高品质及低成本的批量化规模生产，以保证高品质产品的稳定、一致化批量的产出。

以应用直接能量沉积 (DED) 技术为例，较为典型的硬件集成方式为Kerschbaumer等人使用Röders RFM 600 DS五轴高速切削加工机床以及Nd:YAG激光熔覆喷嘴作为复合加工系统，该系统采用送粉的原材料推送方式，实现了增减材复合加工机床的集成与控制。由于激光熔覆过程中，材料喷头移动较为缓慢以及整个喷嘴系统的重量较轻，故不需要额外准备动力系统，直接用机床现有运动平台。喷嘴系统集成于机床主轴有两种方式，分别如图9a和图9b所示。

图9a所示的方式是将激光熔覆喷嘴替换掉切削刀具，集成在

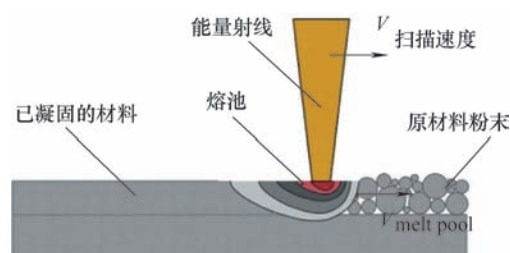


图6 粉床熔融技术原理图



图7 Matsuura公司开发的Lumex Avance-25机床

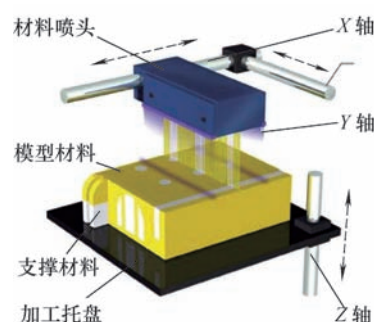


图8 基于光敏聚合物的材料喷射成型原理



赛帕埃惜

日本サイバーRC株式会社

日本进口



Tool Regrind Machine
五轴全自动刀具磨床

Tool Regrind Machine
四轴全自动刀具磨床



Automatic Drill-Honing Machine
自动钻头钝化机

对象刀具

刀具种类	钻头、铣刀、丝锥、铰刀、3刃钻头、侧刃、3刃倒角刀、不等分铣刀、雕刻刀、枪钻
刀具材质	高速钢 (HSS)、钨钢/硬质合金 (carbide)
刀具最大把持直径	φ20 (φ26 ※) ※φ26 规格为选配
刀具长度	45 ~ 200mm

特征

- 操作简单 自动对刀、自动补正偏心 自动研磨
- 对应多种刀具
- 任意设置刀具参数
- 不需编程、可追加新程序，进行版本升级

地址：苏州吴中区金枫路216号
东创科技园C幢108

联系人：代女士

手机：13651758961

电话：0512-62695591

QQ：642504730

邮箱：cybercc_dll@aliyun.com

◆广告 查询编号：0035

机床主轴，这种方式在稍微牺牲了Z轴方向的工作范围前提下，几乎完全保留了XY平面的工作面积。但无法将激光熔覆喷嘴集成在刀具库，因为喷嘴配套有光导管，水冷以及输气管等相关硬件，体积较大且集成难度高。图9b所示的方式是将激光熔覆喷嘴集成在机床主轴的一侧并与之平行，这种集成的方法保留了Z轴的活动范围，但在XY平面的活动范围有所牺牲，牺牲的范围主要由激光喷嘴集成结构的尺寸决定。因为激光器以及相关组件是永久集成在机床主轴上，不需要将其与刀具进行切换，这样大大降低了集成难度。最终采用了图9b的集成方式，在集成激光熔覆喷嘴时，使喷嘴的设计半径尽量小并让喷嘴所在轴尽量靠近机床主轴，从而尽量减少喷嘴的轴心偏离主轴的距离。这样，在进行增

材制造时，激光熔覆喷嘴在XY的活动范围与机床的设计范围几乎保持一致。

在增材制造系统的设计中，目前材料铺层主要有送丝与送粉两种方式。其中送丝方式可实现近乎百分百原材料利用，但是在工艺控制较为困难，成型后的零件易发生变形，影响加工精度。送粉方式的材料利用率较低（<50%），但易定量控制，且工艺过程具有良好的鲁棒性。系统工作时，在理想条件下，送粉的材料经由惰性气体（氩气）保护，通过抗静电导管进入工作区域，送粉方向与激光射线方向同轴。送粉系统采用独立控制单元，激光器与切削刀具采用一套运动机构，具有5个自由度。由此，实现了增减材的加工复合。

软件层面的系统集成需要解决三个主要关键技术：

（1）支撑结构的优化问题。

由于制造的某些零部件具有复杂的几何与拓扑结构，在逐层熔融的时候部分结构悬空或者与零部件失去制造可达性，因此需采用支撑结构加强和支持零件与构建平台的稳定性；抑或在增减材交替加工过程中，需要部件不断地变换方向，从而使得加工的熔融喷头或者刀具能够接触到加工面。同时在集成的机床中，因为刀具以及熔融系统所在的轴方向是固定的，为了能够尽量减少支撑结构跟部件的接触面积以及无法触及的部件面积，需要机床的平台控制软件不断地优化算法，根据不同的加工要求与工序调整部件的方位。这也是对机床CNC系统的要求。

（2）由于在增材加工过程中，材料是一层一层累积的，因此分层处理十分重要，如图10所示。但现有的分层算法以恒定厚度分层法为主，难以克服阶梯变

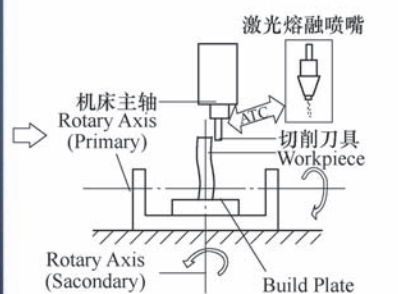
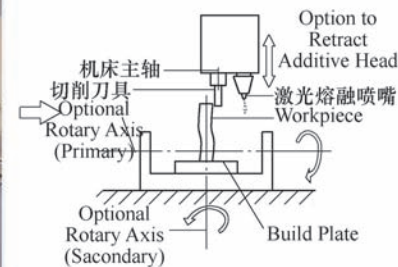
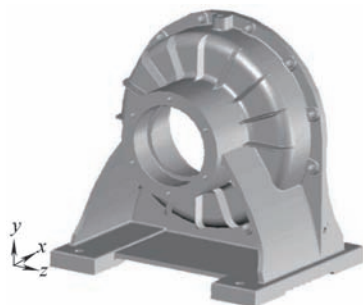


(a)

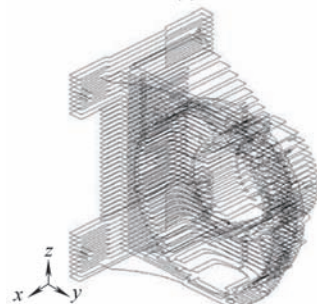


(b)

图9 激光熔覆喷嘴的硬件集成



(a)



(b)

图10 采用STL格式输出的实体分层

形问题。对此，Zhang以及Liou提出基于每一层厚度以及铺层方向，结合零件的几何构造进行打印方向的自适应调整，进而决定加工工序。

(3) 增减材加工工序的最优化。在复合加工过程中，大至增材制造、减材加工和测量(metrology-based proces)等工序相互切换的顺序以及相匹配的支撑结构；小至增材制造激光熔覆喷嘴的轨迹、减材加工刀具的轨迹及加工参数等都需要在加工之前由相应的软件进行事先的模拟，并作出最优选择。在软件做出选择的过程中，会结合制造可达性、结构强度的改变以及机床的运动平台自由度等进行综合考虑。

3. 复合制造机床控制系统

关于控制系统，目前通常使用的方式是在机床原有的CNC控制系统的基础上，在系统的现有工作区域中引入新的增材加工设备。这需要NC系统不仅能够生成刀具以及打印材料喷嘴的轨迹，而且能够快速的在二者之间自由切换。对于增材制造设备，最为关键的是要灵活精准地控制原料的送给速率以及激光能量。但目前的研究与应用仍局限在以试错法为主的开环系统，即在增材制造之前，先决定好制造相关参数，如激光的能量和进料速率等。待制造完成后对参数进行评估与改进。这种方式的局限性在于：在增材制造过程中，送料喷头经过带有转角的位置时，喷头会进行短暂的停顿用来变向，但此时送料的速度不变，其结果就是造成局部材料过度沉积。至

于专门为复合制造设计的闭环系统，因为其设计十分困难，不仅需要先进的插入式测量技术获取加工过程中的各种参数，更要实时处理这些参数以及及时地在加工过程中作出调整。

针对此问题，Kerschbaumer等基于三阶多项式，构建了激光能量与原料送给速度的关系，实现了加工过程的全闭环控制，取得了良好效果。

未来发展趋势

由于基于增减材的复合加工技术研究刚刚起步，并牵涉到较为宽广的技术学科，需要多学科的协同发展，具体来说以下几个方面是未来的发展趋势。

1. 模块化的硬件系统

硬件上，集成结构应朝着模块化发展，模块化的硬件系统具有易于维护、易于交互及易于扩展等优点。图11所示为一种可重构模块化机床的集成设计原理图，首先根据产品的复合加工要求，对现有的机床模块进行相应的集成、替代以及删除并将它们安装在机床的合理位置，形成新的机床模块组成形式；然后基于控制软件的模块库，对应于硬件模块改变，控制模块也进行相应的集成、替代以及删除，并进行保存，从而最终完成新产品的软硬件平台的搭建。此外，单硬件模块也需要发展，如将增材制造的熔融喷头以及相关的冷却系统进行整合，使其能够顺利收纳入刀具库，并借以自动换刀的过程，在切换工序的同时，保护喷头。熔融时的热源也需要进一步改进，以常用的激光为例，虽然



赛帕埃惜

日本サイバーRC株式会社

日本进口



Tool Regrind Machine
五轴全自动刀具磨床



Tool Regrind Machine
四轴全自动刀具磨床



Automatic Drill-Honing Machine
自动钻头钝化机

对象刀具

刀具种类	钻头、铣刀、丝锥、铰刀、3刃钻头、侧刃、3刃倒角刀、不等分铣刀、雕刻刀、枪钻
刀具材质	高速钢 (HSS)、钨钢/硬质合金 (carbide)
刀具最大把持直径	φ20 (φ26 ※) ※φ26 规格为选配
刀具长度	45 ~ 200mm

特征

- 操作简单 自动对刀、自动补正偏心 自动研磨
- 对应多种刀具
- 任意设置刀具参数
- 不需编程、可追加新程序，进行版本升级

地址：苏州吴中区金枫路216号
东创科技园C幢108

联系人：代女士

手机：13651758961

电话：0512-62695591

QQ：642504730

邮箱：cyberrc_dll@aliyun.com

◆广告 查询编号：0035

其工作时对工件造成的热效应相对较弱，但激光的能量利用率比较低，随着能量的增加，使用成本也迅速增加。针对减材加工，为了减少环境的污染，应该发展高速切削加工从而实现干加工，减少切削液的使用。

2. 智能化、集成化的软件系统

软件系统的发展，除了类似于硬件系统一样需要向模块化方向发展外，更需要朝着智能化、集成化发展。在一个集成化的系统中，一个工件的成型始于工件的CAD文件，CAD文件传送到计算机辅助工艺过程设计（computer-aided process planning, CAPP）软件，将CAD模型拆分成一系列能够在工程上实现的子特征，并规划相应的加工工序。对应于具体的工序，加工过程中需要的一些特定参数和刀具的工作轨迹，则依靠计算机辅助制造（Computer Aided Manufacturing, CAM）软件进行说明。值得注意的是这个过程

并不是顺序而下的，而是一个闭环的系统，依托计算机辅助检测（Computer-Aided Inspection, CAI）软件，加工过程中工件实际的成型参数会实时的反馈给CAPP软件进行对比与修正，并在接下来的工序规划中得到体现，循环往复。伴随着加工历史的不断增加，CAPP软件的工序规划也会越来越合理，实际加工产生的误差也会越来越小，如图12所示。

3. 全闭环的机床控制方式

在增材过程中，如基于多传感器技术将零部件的加工物理与几何信息实时传输至控制系统，如激光能量，铺层角度与厚度，以确保增材过程的高效高精加工。针对复合加工过程，根据交变递进的加工工序，需要控制系统具有良好的鲁棒性。因此如何实现加工过程的实时检测和反馈，形成闭环控制，需要进一步地深入研究。

4. 高精多源集成的检测技术

为了满足闭环系统的要求，

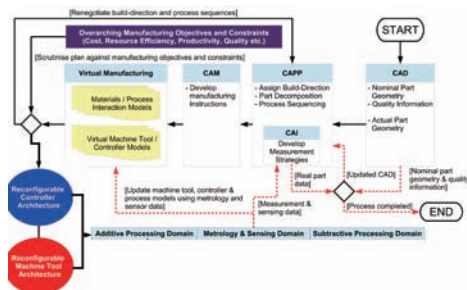


图12 智能化、集成化的系统示意图
需要有先进的检测手段。相比传统的减材加工所具有的丰富成熟的检测手段，增材制造的检测技术较为单一。目前已应用方法中，有的是结合高速摄像机与热成像技术，测量直接能量沉积（DED）过程中熔池的温度与几何形状；或者是结合高速摄像机与光电二极管，分别测量熔池的几何构造以及材料流量，并在闭环系统中实时控制原料的送给速度。因此，集成多种测量传感器的检测技术是下一步发展的重点之一。

结语

增减材复合制加工技术因其结合了增材制造与传统减材加工的优点，对于军事和航空等高价值、高精度加工领域具有重要的发展意义，正吸引着越来越多研究者的目光。

参考文献：

- [1] 鲁方霞，邓朝晖. 数控机床的发展趋势及国内发展现状[J]. 工具技术，2006，（40）3：44-48.
- [2] 李佳特. 现代CNC发展趋势[J]. 制造技术与机床，2003（4）：5-15.
- [3] 黄春平，黄硕文，刘奋成. 金属增材制造技术[J]. 金属制造，2016（2）：34-38.

MW （收稿日期：20160612）

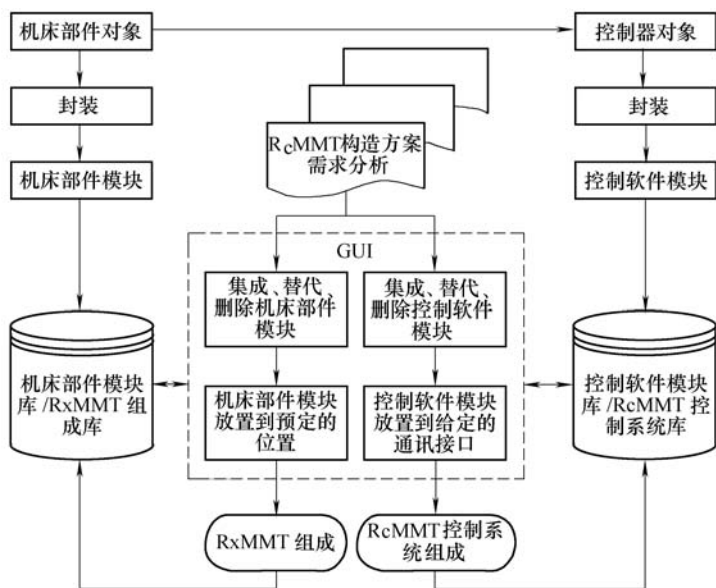


图11 一种可重构机床软件的硬件集成原理