

本文参考文献引用格式:招润焯,丁东红,王凯,等.金属增减材混合制造研究进展[J].电焊机,2019,49(07):66-77.



# 金属增减材混合制造研究进展

招润焯,丁东红,王 凯,卢清华

(佛山科学技术学院 机电工程学院,广东 佛山 528225)

**摘要:**增减材混合制造技术不仅具有增材制造的成形速度快、材料利用率高和复杂结构易成形等优点,还兼具机械加工高质量和高精度等优点,是复杂金属构件整体成形的重要手段之一。介绍了结合增材与减材的增减材混合制造技术,从设备集成和成形工艺两方面综述了其在国内外的研究现状,分析了增减材设备的机械性能、成形方法和集成方式,重点介绍了增减材混合制造路径规划的方法和工艺参数的优化。指出未来增减材混合制造设备和成形工艺的研究方向。

**关键词:**增材制造;增减材混合制造;设备集成;工艺规划;研究进展

中图分类号:TH16

文献标志码:A

文章编号:1001-2303(2019)07-0066-12

DOI:10.7512/j.issn.1001-2303.2019.07.13

## Research progress of metal additive and subtractive hybrid manufacturing technology

ZHAO Runzhuo, DING Donghong, WANG Kai, LU Qinghua

(School of Mechatronics Engineering, Foshan University, Foshan 528225, China)

**Abstract:** The hybrid manufacturing technology of additive and subtractive which is one of the important methods of integral forming complex metal components, have the advantages of high forming speed, high material utilization rate and forming complex structure in additive manufacturing and the advantages of high quality and accuracy in machining. This paper introduces the technology of additive and subtractive hybrid manufacturing as well as its current research situation both at home and abroad from two aspects of equipment integration and forming process. The study analyzes the mechanical properties, forming method and integration way of additive and subtractive equipment, mainly focuses on path planning and optimizes process parameters in hybrid manufacturing. Finally, points out the future research direction of additive and subtractive hybrid manufacturing equipment and forming process.

**Key words:** additive manufacturing; additive and subtractive hybrid manufacturing; equipment integration; process planning; research progress

## 0 前言

增材制造技术是根据材料“逐层堆积”的原理,直接成形三维模型的新兴制造方法。增材制造不受传统加工中刀具、模具、夹具以及工序等多样复杂条件问题的约束,突破传统机械加工的瓶颈,解放

了设计师在传统机械加工中所要考虑的零件装配和结构约束等问题,实现复杂结构整体成形。其可加工材料范围广,包含塑料、陶瓷、橡胶、金属等常用材料<sup>[1]</sup>。其中,金属材料的使用较为普遍,主要原料形式可分为金属粉末和金属丝材。目前,围绕激光、电

收稿日期:2019-04-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51805085,51601043)

作者简介:招润焯(1997—),男,在读硕士,主要从事金属电弧增材制造的研究。E-mail:827198959@qq.com。

通讯作者:丁东红(1987—),博士,特聘教授。E-mail:dd443@uowmail.edu.au。

子束和电弧 3 个主要输入能源<sup>[2]</sup>可用的增材成形方法主要有:选择性激光烧结<sup>[3]</sup>(selective laser sintering)、选择性激光熔覆<sup>[4]</sup>(selective laser melting)、电子束选区熔化<sup>[5]</sup>(selective electron beam melting)、等离子熔积制造<sup>[6]</sup>(plasma deposition manufacturing)、电弧熔丝增材制造<sup>[7]</sup>(wire and arc additive manufacturing)、冷金属过渡<sup>[8]</sup>(cold metal transfer)等。

虽然增材制造能够成形传统机械加工难以加工甚至无法加工的复杂结构件,但其几何精度和表面质量无法与传统机械加工相比<sup>[9]</sup>。一般而言,增材制造后的零件需要进行相应的机械加工等后处理工序,以消除成形过程中的残余热应力和变形对零件的影响,提高零件几何精度和表面质量。然而,对于存在复杂内型面结构的零件,增材后续的机械加工无法对零件的内表面进行加工处理,以达到零件的使用要求。由此可见,单一的增材制造技术难以实现对于有特定表面质量要求的复杂构件的成形与实际生产应用,这是增材制造发展历程中需解决的问题之一。为实现功能性复杂结构件的整体制造,增材制造和减材制造的混合制造技术引起了学者的关注。增减材混合制造技术是一种在增材制造技术的前提下,对传统数控机床的二次开发技术,结合减材制造成形尺寸精度高和表面质量好的优势,弥补增材制造工艺精度低、新型混合加工方法,运用逐层堆叠的增材制造以及适时的切削加工,保证零件成形过程中的尺寸精度和表面质量,从而可在一次加工中直接成形功能性零件,实现零件在同一台数控机床上完成“沉积-精加工”的连续加工过程。其实质是将减材制造融入到增材制造的整个沉积过程中,目的是提高实体零件的几何精度和表面质量,使得最终成形的实体零件与理想的三维模型高度拟合,进一步提高生产效率,节省工作空间,降低复杂结构件的制造难度,实现零件的一体化,在提高零件质量的同时有效地降低生产成本,拓展传统机加工制造复杂结构件的能力<sup>[10-12]</sup>,解决直接制造复杂功能性结构件的瓶颈问题。两种技术结合的优势如图 1 所示。

本文阐述了国内外增减材混合制造技术的发展现状,综述现有增减材混合制造设备及其相关性能,总结增减材混合工艺的发展进程,分析了增减材混合制造的成形路径和工艺参数,最后针对增减材混合制造技术的研究难点,指出未来的发展和

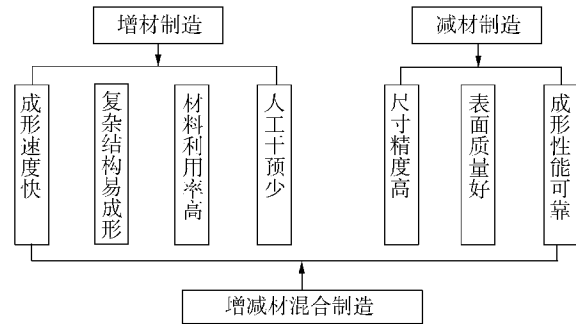


图 1 增减材混合制造技术优势

研究方向。

## 1 国内外增减材设备发展现状

### 1.1 增减材混合制造设备

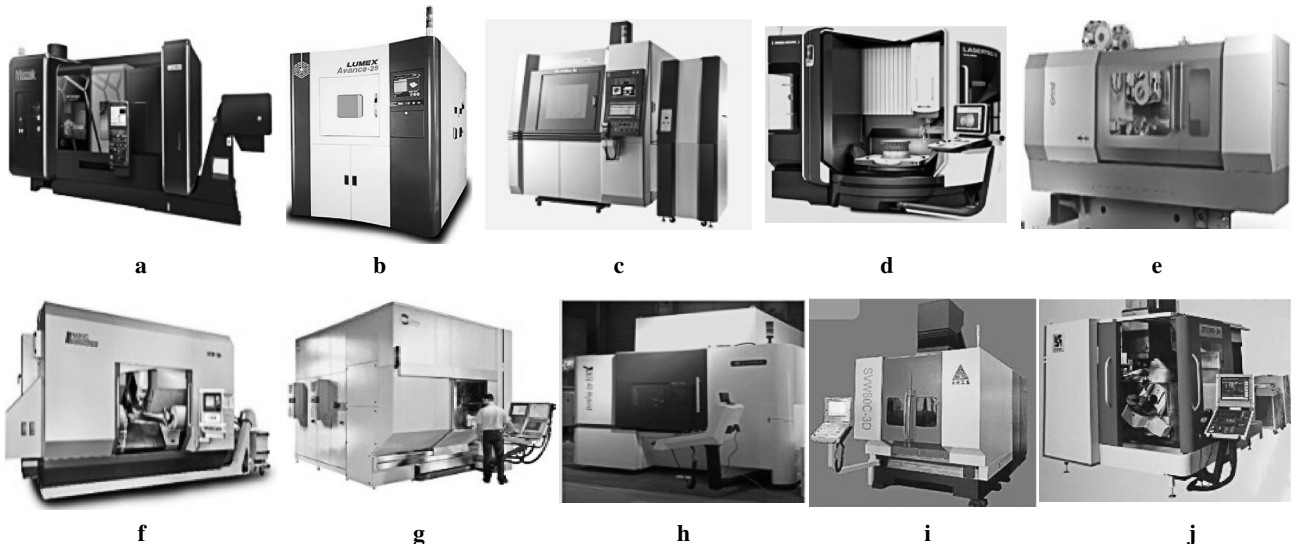
增减材混合制造技术的成型系统主要由多轴数控机床、沉积制造机构、送料机构、软件控制系统和辅助系统组成。由于增减材混合加工技术能实现零件更高的成型工艺要求,因此在军事国防、航空航天、生物医疗、汽车等领域有着广阔的应用前景。鉴于增材制造的灵动性较强,受到的制造工艺约束较少,许多数控机床生产机构相继进军增减材制造领域,将增材机构的设备有机结合到多轴数控机床上,为增减材混合制造的研究提供了很好的硬件基础。现有的增减材设备主要如表 1 所示,国内的发展较国外仍有一定差距,商业化的增减材设备较少。

### 1.2 增减材设备机械性能

由表 1 可知,目前增减材混合加工机床的改造和研发都是基于三轴或五轴的数控机床,其中三轴的增减材混合加工机床制造成本低于五轴机床,且现有的三轴数控加工设备均能低成本改装成增减材混合制造设备<sup>[18]</sup>,但因其自由度较少,制造悬垂结构件需要考虑添加辅助支撑,同时需要考虑机加工刀具干涉的问题,从而增加了制造工艺的设计难度,降低了材料利用率和制造效率。相比之下,多自由度的五轴增减材混合制造机床,XYZ 三直线轴联合 AC 或 BC 两旋转轴进行五轴联动加工(A 轴与 B 轴倾角分别可达 120°和 210°,C 轴可 360°旋转),能实现悬垂结构无支撑制造,进一步解放制造工艺复杂的问题,提高了制造效率和材料利用率,同时其硬件集成性较高、人工干预少,但相应的设备成本较高。纵观目前已有的增减材混合制造机床,虽然增材机构均能很好地集成到数控机床上,但是仍缺乏闭环控制系统对成形过程中混合工艺参数进行

表 1 国内外增减材制造设备

国家	公司	机床型号	混合方式	主要参数	机床外观
日本	Mazak	INTEGREX i-400AM <sup>[13]</sup>	五轴加工中心集成双 Ambit 激光头	可加工 $\phi 660$ mm 和长 1 600 mm 工件, B 轴摆角 $-30^{\circ}/210^{\circ}$	图 a
	Mastuura	Lumex Avence-25 <sup>[14]</sup>	三轴铣削机床混合激光烧结	最大成形尺寸 250 mm $\times$ 250 mm, 每层铺粉厚度 50 $\mu$ m, 尺寸精度达 25 $\mu$ m, 主轴转速 45 000 r/min	图 b
	Sodick	OPM350L <sup>[13]</sup>	高速铣削混合激光烧结	最大成形尺寸 350 mm $\times$ 350 mm $\times$ 360 mm, 激光功率 1 kW	图 c
德国	DMG Mori Seiki	LASERTEC 65 3D <sup>[15]</sup>	五轴机床混合激光熔覆	最大成形尺寸 650 mm $\times$ 650 mm $\times$ 560 mm, A 轴摆角 $-120^{\circ}/120^{\circ}$ , C 轴可 $360^{\circ}$ 旋转	图 d
	ELB 公司	millGrind <sup>[16]</sup>	铣削磨削混合 Ambit 激光堆焊	主轴转速 8 000 r/min, 具有 0.1 $\mu$ m 的 XYZ 分辨率	图 e
	HamuelRe- ichenbacher	HYBRID HSTM 1500 <sup>[11]</sup>	高速铣削混合直接能量熔融	可制造长达 1 750 mm 工件, 精加工主轴转速达 16 000 r/min	图 f
	Hermle	MPA40 <sup>[16]</sup>	立式铣床混合金属热喷射工艺	最大成形尺寸 $\phi 460$ mm $\times$ 550 mm, 质量达 600 kg	图 g
中国	北京机电院机床有限公司	XKR40-Hybrid <sup>[17]</sup>	五轴加工中心混合丝材激光熔覆技术	最大成形尺寸 500 mm $\times$ $\phi 400$ mm, A 轴摆角 $+10^{\circ}/110^{\circ}$ , C 轴可 $360^{\circ}$ 旋转	图 h
	大连三垒机器股份有限公司	SVW80C-3D	五轴加工中心混合金属喷粉激光熔融	工件最大回转直径 1 000 mm, 最大承载 850 kg, A/C 轴转动范围 $\pm 120^{\circ}/360^{\circ}$	图 i
	青海华鼎装备制造有限公司	XF1200-3D	五轴加工中心混合金属喷粉激光熔融	激光功率 1 200 W, 主轴转速 20 000 r/min, B 轴摆角 $+30^{\circ}/-115^{\circ}$ , C 轴可 $360^{\circ}$ 旋转	图 j



实时检测和调整以及集成工艺软件系统的支持。

### 1.3 成形方法及原理

激光增材制造技术发展成熟,且具有较高的成形精度,因此商用的增减材混合制造设备常使用激

光增材,其中包含激光烧结与激光熔覆技术。此外,电弧增材制造技术因其成本低、效率高,在增减材混合制造中的应用方面也开展了大量研究。

激光烧结成形原理如图 2 所示。铺粉机构将原

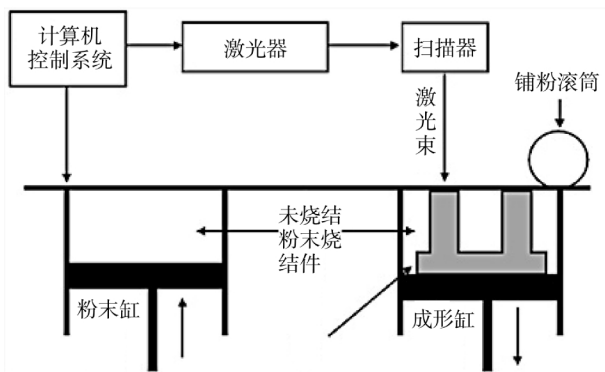


图2 激光烧结成形原理<sup>[19]</sup>

材料进行均匀层铺,根据三维模型信息,采用激光对铺粉区域进行选择扫描,通过升降平台实现铺粉与扫描的循环,直到零件近终成形<sup>[19]</sup>。该技术成形精度高、工艺规划简单且材料利用率高,但受零件翘曲变形的影响,导致运用该技术的混合制造设备只能成形小尺寸工件。

激光熔覆成形原理如图3所示。采用高能激光束熔融供给在基体工件上的金属材料,材料经快速熔化和冷却后堆积在基体表面上,经逐层堆积最终成形所需的三维模型<sup>[20]</sup>。与激光烧结技术相比,该技术沉积效率更高、成形尺寸更大,且能实现不同材料的堆积,从而提高材料性能。该技术常与五轴加工中心混合,提高设备灵活性,拓展混合制造设备的应用范围。图4所示的异形涡轮增压壳体为采用激光熔覆与铣削混合设备加工的典型例子<sup>[19]</sup>,仅在一台增减材混合加工设备上实现零件的直接成形,熔覆过程与铣削加工有序交替,确保良好的成形质量和精度,简化了传统加工中繁杂的工艺过程,降低了产品设计难度和生产周期,进而提高企业经济效益。

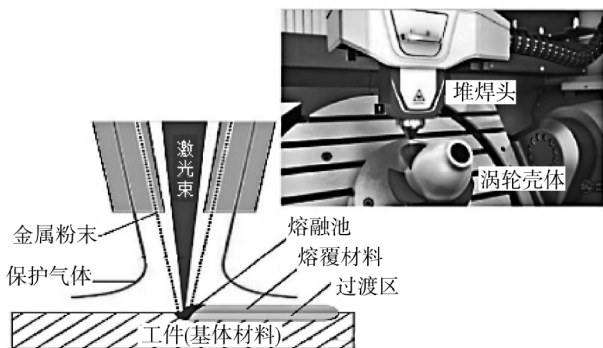


图3 激光熔覆成形原理<sup>[16]</sup>

相比激光增材制造技术,电弧增材制造技术具有成形尺寸大、沉积速率高、成本低等优势,在航空、船舶、汽车等领域具有广泛的应用前景<sup>[21]</sup>。其成形



图4 异形涡轮增压壳体<sup>[15]</sup>

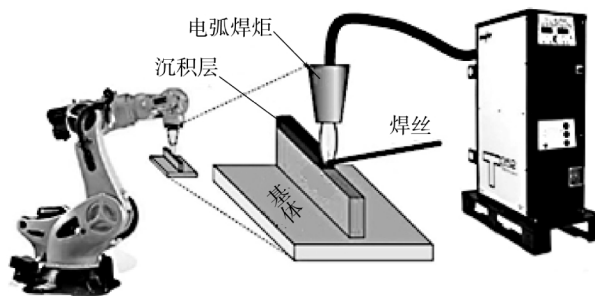


图5 电弧增材成形原理<sup>[22]</sup>

原理如图5所示,采用送丝机构供给材料,以电弧作为输入能源,根据沉积路径在基体上进行逐层堆积。由于沉积质量和精度较差,通常需要对沉积部分进行机加后处理,因此提出了电弧与机加混合的增减材混合制造技术。

### 1.4 增减材设备集成方式

一般而言,增材机构与数控加工中心的集成主要分为替换与并列两种形式,集成原则主要考虑设备集成难度、制造效率、经济成本等因素。如图6所示,前者是在主轴旁增设增材机构模块,主轴通过替换的形式完成刀具与激光熔覆设备的交替,实现减材与增材过程的互换,此方法虽然影响了主轴的行程距离,但能保证XY轴的行程距离不受影响。后者是将增材机构直接集成在与机床主轴平行的位置上,随主轴运动而运动,只需进行相应的坐标变换即可实现减材与增材过程的互换,从而节省工具切换所需时间,由于焊枪与主轴之间有一定距离,虽然不影响主轴行程距离,但会牺牲XY轴的工作区域<sup>[1]</sup>。

## 2 增减材混合制造工艺研究

### 2.1 增减材工艺研究进展

目前,增减材混合制造的研究热点不仅集中于

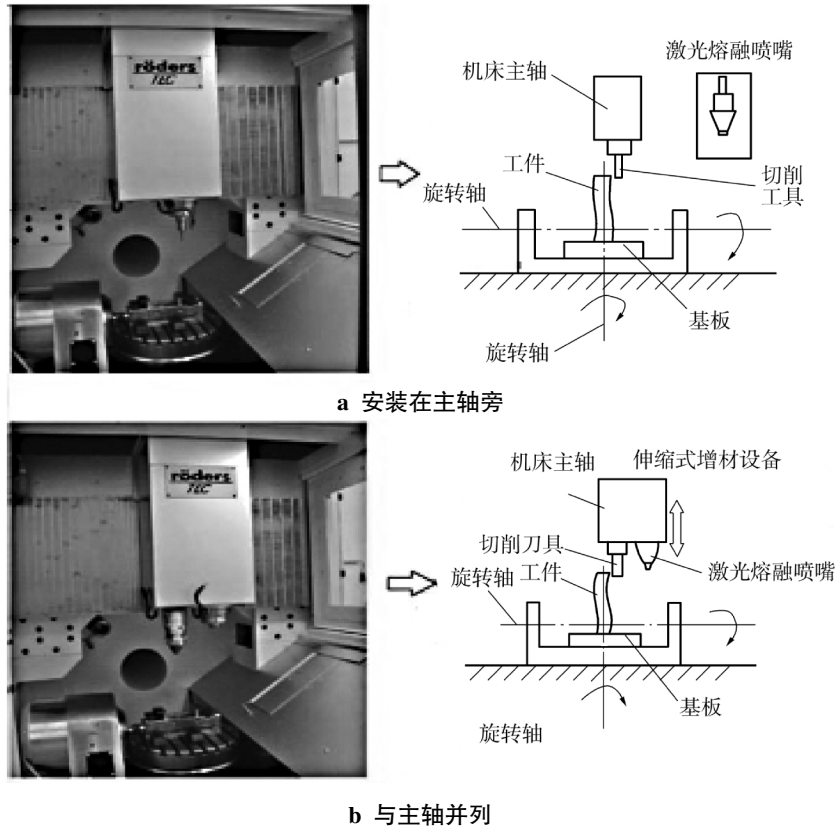


图 6 增材设备与机床集成方式<sup>[14]</sup>

有效集成增材制造和机械加工,在增减材混合工艺规划的问题上也开展了相应研究。增减材混合制造的工艺不同于单一机械加工或增材制造工艺,也不是两者工艺的简单混合,而是综合考虑增材和减材之间相互的影响因素,确保零件能够成功加工,充分发挥增减材混合制造技术的优势。增减材混合

工艺的规划主要考虑零件的成形精度与制造效率之间的权衡,通过良好的工艺规划,在提高成形精度的同时保持制造效率或尽可能少地减少制造效率。不同增减材混合制造技术所能达到的技术要求如表 2 所示。

华中科技大学张海鸥等研究了等离子熔积与

表 2 增减材混合制造不同零件的技术要求

混合技术	材料	微观结构及机械性能	几何精度	表面质量	文献
激光沉积+铣削	304 不锈钢粉末	等轴晶组织、抗拉强度 632 MPa	—	—	[15]
等离子沉积+铣削	铁-镍-铬基合金粉末	典型凝固组织(等轴晶组织)	±0.05%	2.32 μm	[23]
GMAW+铣削	316L	满密度、无气孔或裂纹	±0.03 mm	Ra ≤ 0.869 μm	[32]
GMAW+铣削	低碳钢 AWS 5.18 70S-6	全致密组织、抗拉强度 620 MPa	±0.01 mm	2 μm	[28]
GMAW+铣削	A12325 合金	—	—	1.38 μm	[30]

铣削复合技术(Hybrid Plasma Deposition&Milling),分析复合工艺参数对熔积成形和机加工工艺的影响<sup>[23-24]</sup>,其试样件如图 7a 所示,同时还研究了熔融沉积与连续轧制复合直接制造金属零件方法<sup>[25]</sup>,并成功试制了大型金属零件如图 7b 所示。夏然飞等<sup>[26]</sup>研究了电弧增材与铣削复合加工系统和工艺,采用

自主研发的软件系统实现增减材路径规划的自动控制,电弧与铣削的制造过程如图 8 所示。陈森昌等<sup>[27]</sup>基于 CMT 技术,研发了增减材一体化复合加工系统。韩国科学技术研究院 Yong-Ak Song 等<sup>[28]</sup>基于熔化极气体保护焊,研究了 3D 焊接和铣削复合加工技术。K.P.Karunakaran 等<sup>[18]</sup>研究了基于电弧的分

层复合制造方法(Arc hybrid layered manufacturing)。Zicheng Zhu 等<sup>[29]</sup>研究了集熔丝增材制造、机械加工和测量三者工艺复合的加工技术,实现复杂难加工零件的高精度制造。Fang Li 等<sup>[30]</sup>研究了电弧熔丝和

铣削复合加工技术的工艺参数对成型效率、材料利用率和表面质量的影响。李仲宇等<sup>[31]</sup>基于自主开发的增减材实验平台,验证了增减材混合加工算法的可行性。

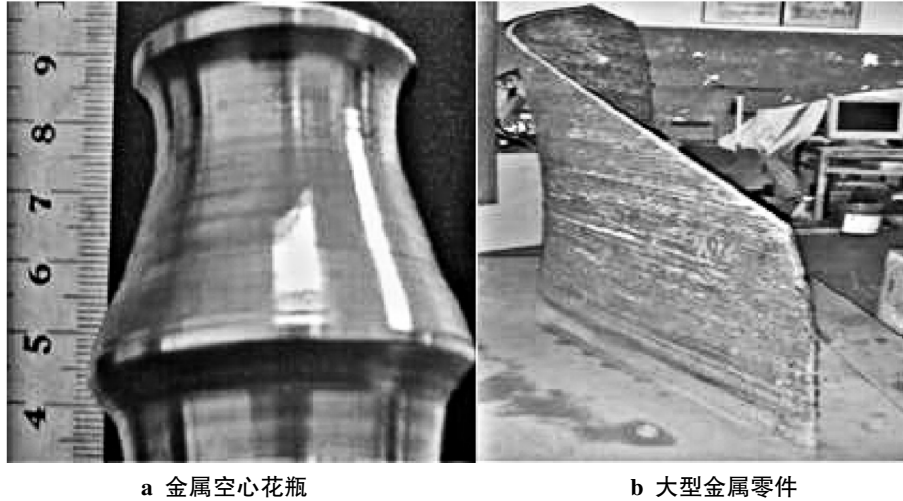


图7 增减材混合制造零件<sup>[23,25]</sup>



图8 混合铣削的电弧增材制造<sup>[26]</sup>

## 2.2 混合成形工艺规划研究

结合国内外对增减材混合工艺规划的研究,规划策略可归类为3种:先增后减、增减交替与分解重构策略,3种策略均有其各自的优势与功用。

### 2.2.1 “先增后减”工艺研究

“先增后减”策略的过程主要是零件在增材制造完成后再进行机加后处理,以提高几何精度和表面质量,一般运用于制造简单几何结构的零件,由于不具有复杂的内部结构,因此该策略主要着力于提高零件的成型效率和材料利用率。

Ding 等<sup>[33]</sup>基于电弧增材制造技术的优点和机

器人电弧焊接,研究了一个全自动化系统,能使零件在无人工干预的情况下,从最初的三维 CAD模型制造为成品零件。全自动化系统关键环节主要包括:切片分层、路径规划、焊接工艺参数设置、后加工和生成机器人加工代码。通过采用容错法对输入的CAD模型进行切片分层处理,采用中轴变换算法对得到的2.5D切片层进行路径规划,通过轮廓偏移法生成后处理加工路径,最后自动转化生成机器人加工代码。同时,运用焊道模型<sup>[34]</sup>控制切片层厚和焊道间距,根据所得到的焊接路径从数据库中自动选择最优焊接工艺参数。Ding 等人基于中轴变换提出了

骨骼偏置路径规划方法以适应复杂几何件的致密填充,如图 9 所示。

Yanhua Zhao 等<sup>[35]</sup>针对增减材混合制造中铣削对激光增材制造件残余应力的影响进行了试验分析,探究机械载荷和热载荷对零件表面残余应力的影响,铣削过程中以每齿进给量和轴向切削深度为控制变量,当每齿进给量逐渐增加时,压应力会逐渐增大,达到一定值时则会逐渐减小,并转变成拉

应力。同样,随着铣削深度的增加,零件表面压应力逐渐增加,但当铣削深度增大到一定程度时,压应力反而逐渐降低。运用有限元分析软件模拟分析每齿进给量对切削力和切削温度的影响,如图 10 和图 11 所示,从而改变零件表面残余应力分布。结果表明,切削产生的机械载荷是影响零件表面残余应力分布的关键影响因素,并且与金属零件自身的应力进行耦合,产生新的残余应力分布。

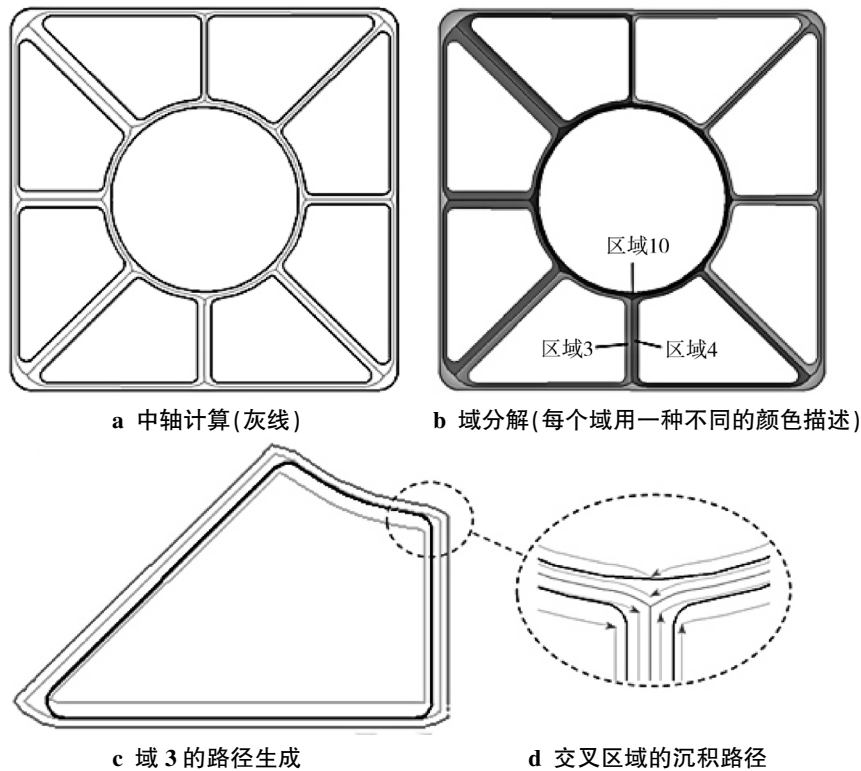


图 9 中轴变换的路径规划说明<sup>[35]</sup>

陈曦等<sup>[36]</sup>针对 SLM 工艺成形的 316L 不锈钢成型件的铣削参数,结合铣削参数预测模型和表面粗糙度预测模型,研究了铣削参数对 SLM 工艺成形的 316L 不锈钢成型件表面粗糙度的影响,每齿进给量对表面粗糙度有着显著影响。通过粒子群算法<sup>[37]</sup>得出最佳铣削参数,为不锈钢复杂构件在增减材制造中铣削参数的选择提供合理模型。

### 2.2.2 “增减交替”工艺研究

“增减交替”策略的思想是:在零件近净成形的过程中运用增材与减材工艺的合理交替,以提高零件内部结构的质量和精度,实现复杂几何构件高精度制造。由于增减材工艺交替进行,因此该策略的重点是提高复杂构件的成形质量和精度。

袁绍华等<sup>[32]</sup>开展了针对多特征零件高质量和

高精度制造的研究。基于电弧熔丝增材制造技术,根据自主开发的 HDM-CAD 软件,直接生成熔积和铣削工位相互切换的混合加工路径,通过工位转换对零件特征部位进行铣削精加工。分析零件在增减材制造过程中的温度场,充分利用沉积过程中的热量,从而降低机加工的难度,弱化焊接热对制件精度的影响。复合制造工艺过程如图 12 所示。

夏然飞等<sup>[26]</sup>采用自主搭建的电弧与铣削增减材混合加工系统,基于自主研发的 WAAM 软件,通过自定义工艺参数,实现从三维模型的输入到成形过程的仿真,并生成控制整个制造工艺的混合 NC 代码。分别采用轮廓偏移或平行线扫描的方法规划增材路径,铣削路径则使用螺旋式扫描方式,如图 13 所示,当沉积高度达到一定值时自动切换成铣削加工。

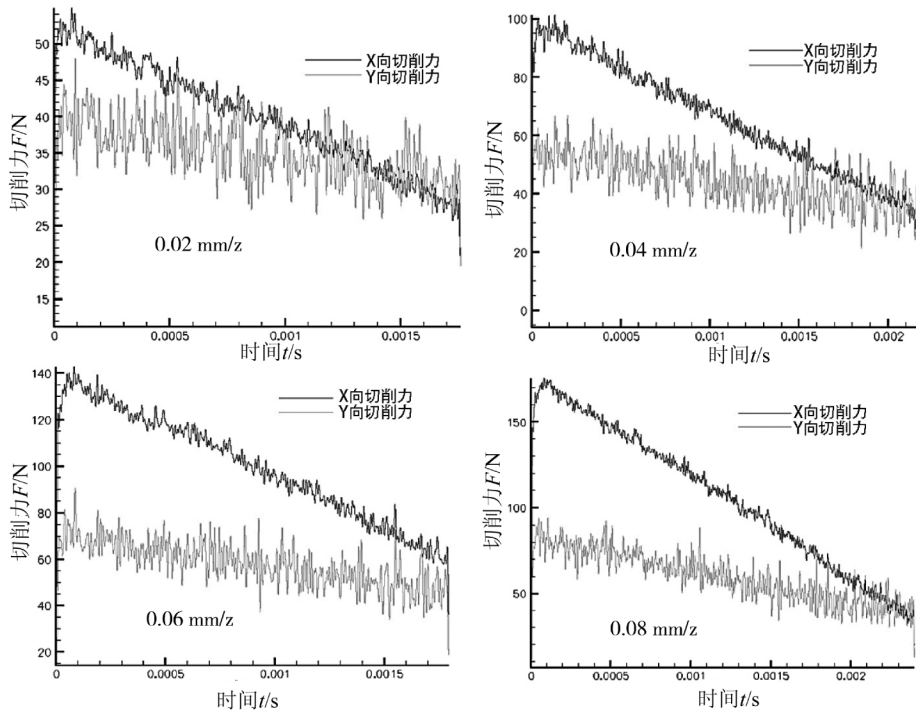


图 10 每齿进给量对切削力的影响<sup>[35]</sup>

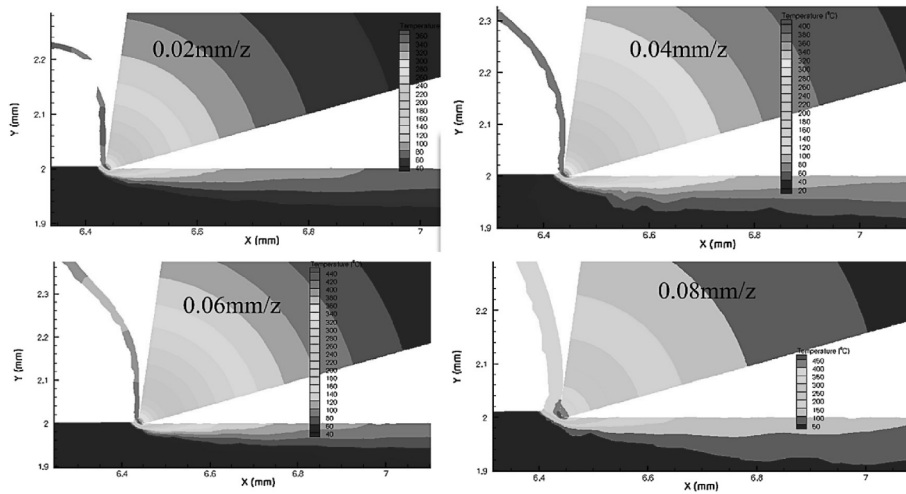


图 11 每齿进给量对切削温度的影响<sup>[35]</sup>

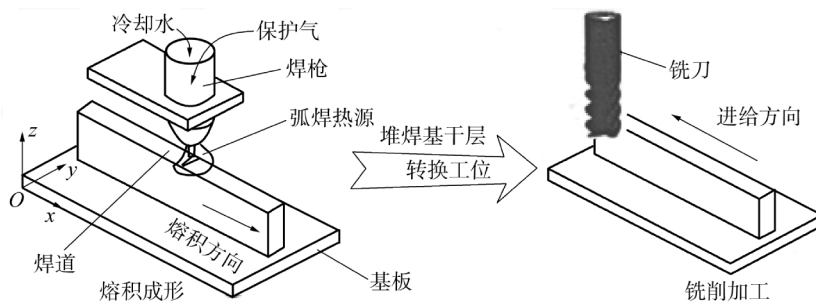


图 12 复合制造工艺过程<sup>[32]</sup>



由于其焊接参数仍需人工干预,无法进行最优化选

择,并且其工艺规划难以实现复杂构件的制造。

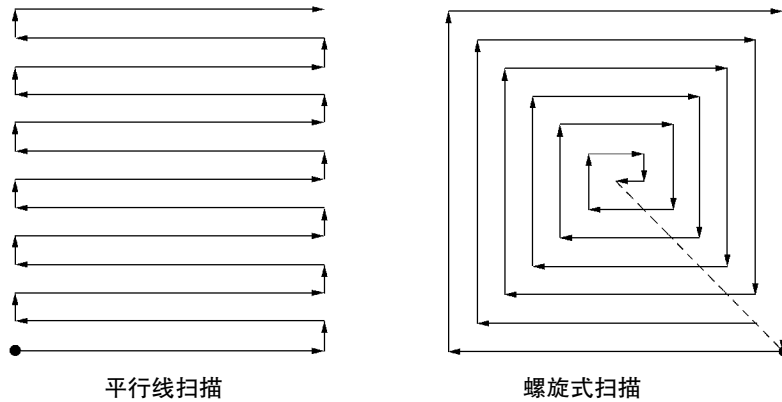


图 13 工艺路径规划<sup>[26]</sup>

K. P. Karunakaran 等<sup>[18]</sup>研究了电弧混合分层制造(arc hybrid layered manufacturing, ArcHLM)的工艺方法,结合增材和减材两种制造方法的优点,在同一台机床上实现近净金属沉积和精加工。根据用户设定的工艺参数,通过自主研发的分层软件将模型切为等厚层,采用电弧熔丝逐层堆焊并在每层沉积后进行面铣削,以减少沉积方向的误差积累,为下层沉积提供良好表面,最终对整个零件进行精加工。此方法牺牲了成形效率来提高近净成形件质量,同时对于复杂结构件,其最终的精加工阶段潜在由于刀具可达性问题,导致无法实现零件内部特征进行精加工的可能。

度下的微观组织差异和不同沉积方向对成型件机械性能的影响。采用田口方法<sup>[38]</sup>对基于熔化极气体保护焊(Gas Metal Arc Welding, GMAW)的 3D 焊接和铣削混合制造技术的主要工艺参数进行优化设计。运用方差分析得出焊接飞溅主要与焊接电压、送丝速度和焊枪与工作表面的高度有关,而焊道宽度主要受控于焊接电压和送丝速度。

韩国科学技术研究院 Yong-Ak Song 等<sup>[28]</sup>通过自主开发的 CyberRP 软件对 STL 文件进行相应的预处理,优化了沉积过程的工艺参数,运用简单的表面铣削替代了实时在线温度和高度检测来控制每一层的层厚,成功试制出具有良好机械性能的全致密金属件,并分析了冷却速度引起的零件不同高

Fang Li 等<sup>[30]</sup>基于电弧熔丝和铣削的增减材混合加工技术,研究了加强筋的制造工艺优化问题。基于遗传算法优化沉积参数和铣削参数,最大化地提高成形表面质量、材料利用率和成形效率。在增材部分,通过 RIT2000 机器并配备双送丝机构实现沉积,减材部分运用 KR500 机加设备进行高速铣削。关联回归模型如图 14 所示,通过建立沉积参数与焊宽、铣削参数与表面质量两个关联的回归模型确定关键工艺参数,并通过方差分析验证模型的可行性。为避免热积累,每沉积完一层均要等零件冷却至室温才能进行下一步沉积或铣削,大大增加了制造时间。

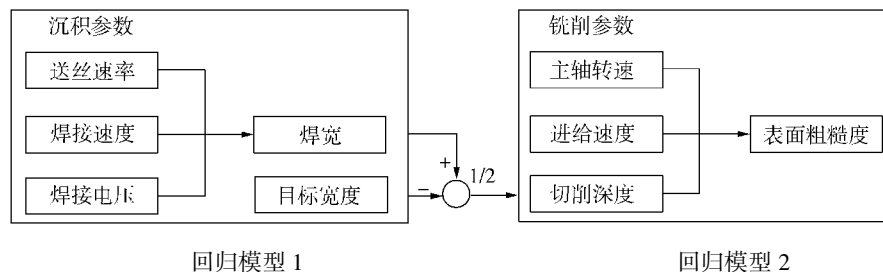


图 14 关联回归模型<sup>[30]</sup>

武汉科技大学 Xinhong Xiong 等<sup>[23]</sup>采用正交试验法优化了等离子沉积的主要工艺参数,并且指出了影响焊道质量的主要影响因子。为获得良好的表

面质量,深入探究铣削加工每齿进给量与铣削速度之间的关系,成功试制了具有较高表面质量和尺寸精度以及良好微观结构的变直径金属空心花瓶试

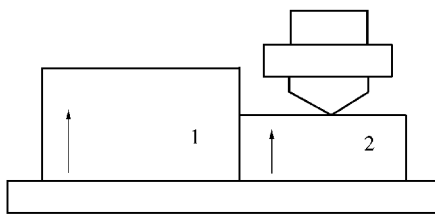
样件。张军涛等<sup>[15]</sup>基于国内首台 LASERTEC 65 3D 增减材混合加工机床,研究了激光直接金属沉积的工艺参数对不锈钢零件成形质量的影响,根据最佳工艺参数制成的零件具有较高的抗拉强度、伸长率以及与锻件相当的力学性能。

### 2.2.3 “分解重构”工艺研究

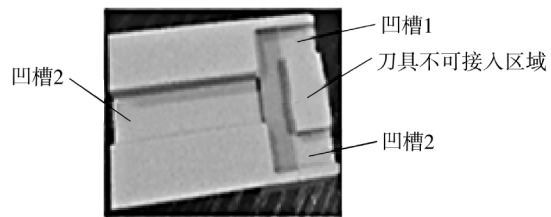
“分解重构”策略是基于增减交替过程中的难题而延伸出的新兴制造工艺,通过将具有复杂内部特征的结构件进行特征分解再重构的过程,更好地结合增材与减材工艺,实现复杂零件的无支撑制造,

充分发挥五轴机床的能力。由于该策略能保证成形件的质量和精度,因此策略的重点在于进一步提高制造效率和材料利用率。

姚荣斌等<sup>[39]</sup>基于模型分割制造思想,研究了复合加工工艺规划算法(Hybrid process planning algorithm, HPPA)。通过将复杂零件分解成一系列暴露特征的子零件,分析各子零件相互的特征关系,确定可行的建造方向和增减材操作序列,重点解决增减材机构的可接入性问题,如图 15 所示,并得出时间最优的增减材操作序列。



a 沉积喷嘴碰撞



b 单独减材加工零件剖视图

图 15 增减材机构的可接入性<sup>[39]</sup>

Zicheng Zhu 等<sup>[29]</sup>研究了集熔丝制造、铣削加工和检测于一体的复合工艺在复杂难加工零件的高精度制造中的应用。基于刀具可达性、生产时间和尺寸精度,提出了将零件特征分解再重构的工艺规划算法(iAtractive),实现复杂几何零件的高精度制

造。同时,通过实现沉积过程中实时检测,对已生成的静态工艺进行动态修正,其过程如图 16 所示,将沉积后不在误差范围内的子零件进行切削加工,以保证成形零件的尺寸精度。

LanRen 等<sup>[40]</sup>研究了基于多轴机床复合激光熔

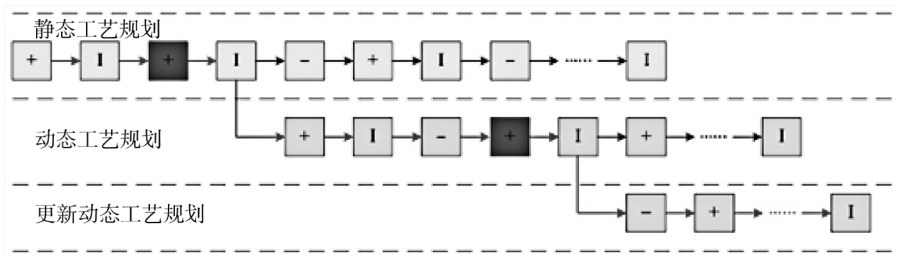
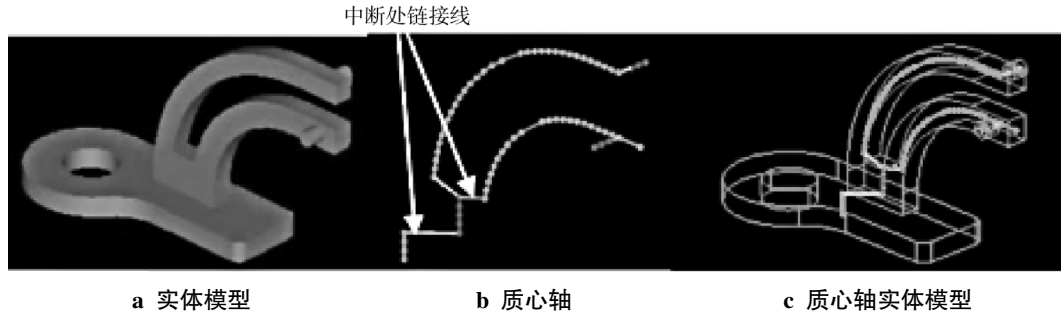


图 16 动态工艺修正过程<sup>[29]</sup>

覆增材制造技术的集成工艺规划,对混合制造过程中的各个模块进行整合工艺规划,通过自主研发的集成工艺规划软件平台,实现无人工干预的全自动化三维混合制造功能性零件。通过将零件分解成许多子零件,再对子零件进行分层切片,确定其建造方向;通过构建子零件的制造序列确定各子零件之间的制造关系,最终成形所需三维零件。对于沉积工艺规划部分,通过运用质心轴提取算法,如图 17 所示,充分利用五轴机床的旋转自由度,实现无支撑结构直接生成零件,运用碰撞检测算法,改进各子零件在沉积过程中与沉积头可能会产生

的碰撞干涉问题,对每沉积一层后的 CAD 模型进行实时更新和碰撞检测,最终输出零件实际构建序列。此外,还开发了自适应沉积刀具轨迹算法,同时运用正交轨迹和等高平行线轨迹,有效地避免沉积空洞现象实现最高效率的沉积刀具轨迹,最后对沉积成形的零件进行机械加工表面后处理。

Frank Liou 等<sup>[41]</sup>研究粉末喷射与激光同轴熔覆对熔池形状、熔深和流动形态的影响,在验证模型的基础上,进一步研究工艺参数对熔池尺寸和峰值温度的影响。同时通过自动化工艺规划,减少人工干预和制造时间,实现高精密直接制造复杂金属零件。

图 17 质心轴提取<sup>[40]</sup>

### 3 未来发展趋势

#### 3.1 成形加工设备的发展

目前,在增减材混合制造设备的硬件系统方面均有许多研究成果,能将相应的增材机构集成到数控机床,但是大多数的改造设备旨在满足相应的实验要求,能够真正投入商用的混合加工机床相对较少。在软件系统方面,由于增减材混合加工技术仍处于发展阶段,针对不同的加工要求,混合制造工艺规划优化的问题仍缺乏系统性研究,同时成形质量和成形效率之间效益最大化问题仍需深入研究。在控制系统方面,实现增减材混合制造过程中的实时检测反馈、对成形过程中混合工艺参数进行动态调整、形成全闭环控制等难题,以及对沉积路径与机加轨迹的快速衔接问题,仍需要展开深入研究。

#### 3.2 成形工艺的发展

在增减材混合制造过程中,过热输入会导致变形和残余热应力,因此如何有效引入机加工工艺以弱化零件的变形和残余热应力仍然是研究难点。同时,由于采取不同的沉积工艺势必会对机加工工艺造成相应影响,因此机加工工艺应能实现对沉积工艺的自适应规划。在混合制造过程中,后续的增材工序势必会引起已加工部分热变形,从而降低表面和尺寸精度,通过热力学计算与仿真实现增减交替的工序优化将是研究方向之一。此外,根据不同的成形材料与技术要求,得到相应的最佳制造工艺和最优工艺参数,最终达到控形控性的目的,是混合成形工艺参数未来的研究方向。

#### 参考文献:

- [1] 陈双,吴甲民,史玉升. 3D 打印材料及其应用概述[J]. 物理,2018(11):715-724.
- [2] 刘勇,任香会,常云龙,等. 金属增材制造技术的研究现

状[J]. 热加工工艺,2018(19):15-19+24.

- [3] 贾礼宾,王修春,王小军,等. 选择性激光烧结技术研究与应用进展[J]. 信息技术与信息化,2015(11):172-175.
- [4] 杨佳,郭洪钢,谭建波. 选择性激光熔化技术研究现状及发展趋势[J]. 河北工业科技,2017(04):300-305.
- [5] 郭超,林峰,张平平. 增材制造让生产线更柔性——增材制造技术之电子束熔化[J]. 现代制造,2016(47):10-12.
- [6] 张海鸥,徐继彭,王桂兰. 等离子熔积直接快速制造金属原型技术[J]. 中国机械工程,2003(12):94-96+7.
- [7] 耿海滨,熊江涛,黄丹,等. 丝材电弧增材制造技术研究现状与趋势[J]. 焊接,2015(11):17-21+69.
- [8] 刘一搏,孙清洁,姜云禄,等. 基于冷金属过渡技术快速成形工艺[J]. 焊接学报,2014(07):1-4+113.
- [9] 钱应平,黄菊华,张海鸥. 金属零件的直接无模近终成形技术[J]. 机械设计与制造,2007(11):121-123.
- [10] 马立杰,樊红丽,卢继平,等. 基于增减材制造的复合加工技术研究[J]. 装备制造技术,2014(07):57-62.
- [11] 董一巍,赵奇,李晓琳. 增减材复合加工的关键技术与发展[J]. 金属加工(冷加工),2016(13):7-12.
- [12] 张海鸥,向鹏洋,芮道满,等. 金属零件增量复合制造技术[J]. 航空制造技术,2015(10):34-36.
- [13] 洪月蓉. 增减材复合数控机床[J]. 内燃机与配件,2017(13):27-28.
- [14] 张曙. 增材制造和切削混合加工机床[J]. 机械制造与自动化,2015(06):1-7.
- [15] 张军涛,张伟,李宇佳,等. 基于 dmg Mori Lasertec 65 3d 加工中心的不锈钢粉末激光沉积增/减材复合制造[J]. 粉末冶金材料科学与工程,2018,(04):368-374.
- [16] 张曙. 增材与切削混合五轴加工机床技术[J]. 金属加工(冷加工),2016(05):2-4.
- [17] 彭伟,王宝和,邵璟. 增减材复合机床开发及应用研究项目[J]. 世界制造技术与装备市场,2018(04):47-50.
- [18] Karunakaran K P, Suryakumar S, Pushpa V, et al. Low cost integration of additive and subtractive processes for hybrid layered manufacturing[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2010, 26(5):490-499.
- [19] 任乃飞,张福周,王辉,等. 金属粉末选择性激光烧结技

- 术研究进展[J]. 机械设计与制造,2010(02):201-203.
- [20] 张瑞珠,李林杰,唐明奇,等. 激光熔覆技术的研究进展[J]. 热处理技术与装备,2017(03):7-11.
- [21] 熊江涛,耿海滨,林鑫,等. 电弧增材制造研究现状及在航空制造中应用前景[J]. 航空制造技术,2015(Z2):80-85.
- [22] 王庭庭,张元彬,谢岳良. 丝材电弧增材制造技术研究现状及展望[J]. 电焊机,2017,47(08):60-64.
- [23] Xiong X,Zhang H,Wang G. Metal direct prototyping by using hybrid plasma deposition and milling[J]. Journal of Materials Processing Technology,2009,209(1):124-130.
- [24] 张海鸥,熊新红,王桂兰,等. 等离子熔积成形与铣削光整复合直接制造金属零件技术[J]. 中国机械工程,2005,(20):1863-1866.
- [25] Zhang H, Wang X, Wang G, *et al.* Hybrid direct manufacturing method of metallic parts using deposition and micro continuous rolling[J]. Rapid Prototyping Journal,2013,19(6):387-394.
- [26] 夏然飞,樊建勋,李新宇,等. 电弧增材制造与铣削复合加工系统与工艺研究[J]. 制造业自动化,2016,(09):79-83+105.
- [27] 陈森昌,张李超,史玉升,等. 电弧与机械加工集成的增/减材复合成型系统的研发[J]. 电焊机,2018,48(10):110-113.
- [28] Song Y A, Park S, Choi D, *et al.* 3D welding and milling: Part I – a direct approach for freeform fabrication of metallic prototypes[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2005, 45(9):1057-1062.
- [29] Zhu Z, Dhokia V, Newman S T, *et al.* Application of a hybrid process for high precision manufacture of difficult to machine prismatic parts[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 74(5-8):1115-1132.
- [30] Li F, Chen S, Shi J, *et al.* Evaluation and Optimization of a Hybrid Manufacturing Process Combining Wire Arc Additive Manufacturing with Milling for the Fabrication of Stiffened Panels[J]. Applied Sciences-Basel, 2017, 7(12):1233.
- [31] 李仲宇,李迎光,刘长青. 基于5+1轴的增减材混合加工验证平台设计与研制[J]. 航空制造技术,2018(08):97-101.
- [32] 袁绍华,张海鸥,王桂兰,等. 熔积和铣削复合精密无模快速制造金属零件[J]. 新技术新工艺,2011(11):74-77.
- [33] Ding D, Shen C, Pan Z, *et al.* Towards an automated robotic arc-welding-based additive manufacturing system from CAD to finished part[J]. Computer-Aided Design, 2016(73):66-75.
- [34] Ding D, Pan Z, Cuiuri D, *et al.* A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM)[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2015(31):101-110.
- [35] Zhao Y, Sun J, Li J, *et al.* The stress coupling mechanism of laser additive and milling subtractive for FeCr alloy made by additive-subtractive composite manufacturing[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2018(769):898-905.
- [36] 陈曦,蒋国璋,段现银. 激光选区熔化成型件铣削表面粗糙度预测模型及参数优化研究[J]. 现代制造工程,2018(10):51-56.
- [37] 秦元庆,孙德宝,李宁,等. 基于粒子群算法的移动机器人路径规划[J]. 机器人,2004(03):222-225.
- [38] 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[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2005, 45(9):1063-1069.
- [39] 姚荣斌,杨乐新,戴丽莉. 增减材制造的复合加工工艺规划研究[J]. 机械科学与技术,2018(07):1076-1081.
- [40] Ren L, Sparks T, Ruan J, *et al.* Integrated Process Planning for a Multi-axis Hybrid Manufacturing System[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering-Transactions of the Asme, 2010, 132(2):[页码不详].
- [41] Liou F, Slattery K, Kinsella M, *et al.* Applications of a hybrid manufacturing process for fabrication of metallic structures[J]. Rapid Prototyping Journal, 2007, 13(4):236-244.