



湖北省学术著作出版专项资金资助项目

3D打印前沿技术丛书

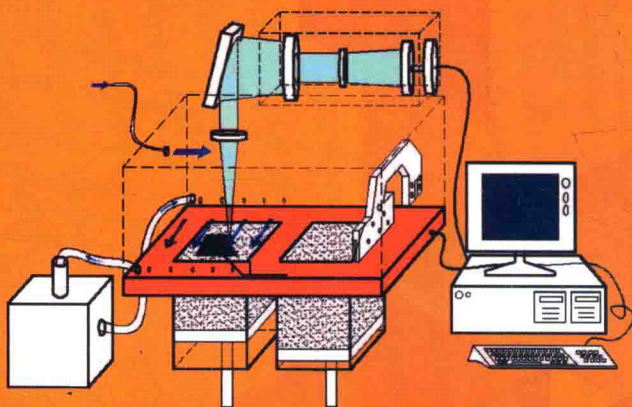
丛书顾问◎卢秉恒 丛书主编◎史玉升

激光选区 熔化3D打印技术

杨永强 王 迪◎著

JIGUANG XUANQU

RONGHUA 3D DAYIN JISHU



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>



湖北省学术著作出版专项资金资助项目

3D打印前沿技术丛书

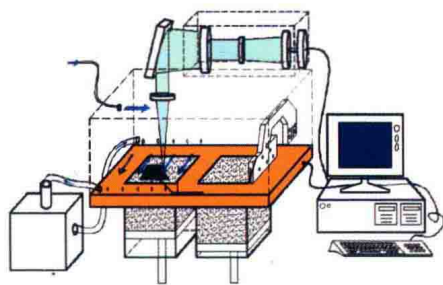
丛书顾问◎卢秉恒 丛书主编◎史玉升

激光选区 熔化3D打印技术

杨永强 王 迪◎著

JIGUANG XUANQU

RONGHUA 3D DAYIN JISHU



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

中国·武汉

内 容 简 介

本书基于作者在激光选区熔化 3D 打印技术领域多年的研究经验撰写而成。本书阐述了激光选区熔化 3D 打印技术的基本原理,介绍了激光选区熔化熔池热物理过程、成形工艺、材料性能、设备关键技术,并从激光选区熔化 3D 打印技术的设计约束、设计方法及数据处理,激光选区熔化 3D 打印技术与传统制造方法的复合,定制化医疗器具设计、制造及应用,复杂功能零件的设计、制造应用等几个方面展开了论述。

本书适合作为高等学校机械专业学生以及 3D 打印技术相关领域研究人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

激光选区熔化 3D 打印技术/杨永强,王迪著. —武汉:华中科技大学出版社,2019.3

(3D 打印前沿技术丛书)

ISBN 978-7-5680-5083-8

I. ①激… II. ①杨… ②王… III. ①立体印刷-印刷术 IV. ①TS853

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 052284 号

激光选区熔化 3D 打印技术

杨永强 王 迪 著

Jiguang Xuanqu Ronghua 3D Dayin Jishu

策划编辑:张少奇

责任编辑:姚同梅

封面设计:原色设计

责任校对:刘 竣

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

电话:(027)81321913

武汉市东湖新技术开发区华工科技园

邮编:430223

录 排:武汉楚海文化传播有限公司

印 刷:湖北新华印务有限公司

开 本:710mm×1000mm 1/16

印 张:8

字 数:163 千字

版 次:2019 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

定 价:76.00 元



本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务
版权所有 侵权必究



3D 打印前沿技术丛书

顾问委员会

主任委员 卢秉恒(西安交通大学)
副主任委员 王华明(北京航空航天大学)
 聂祚仁(北京工业大学)

编审委员会

主任委员 史玉升(华中科技大学)
委员 (按姓氏笔画排序)
朱 胜(中国人民解放军陆军装甲兵学院)
刘利刚(中国科学技术大学)
闫春泽(华中科技大学)
李涤尘(西安交通大学)
杨永强(华南理工大学)
杨继全(南京师范大学)
陈继民(北京工业大学)
林 峰(清华大学)
宗学文(西安科技大学)
单忠德(机械科学研究总院集团有限公司)
赵吉宾(中国科学院沈阳自动化研究所)
贺 永(浙江大学)
顾冬冬(南京航空航天大学)
黄卫东(西北工业大学)
韩品连(南方科技大学)
魏青松(华中科技大学)



About Author 作者简介



杨永强 华南理工大学教授,博士生导师。主要从事增材制造(3D 打印)、激光材料加工、焊接装备与工艺等方面的研究工作,成功研制出国内第一台激光选区熔化(SLM)快速成形机,并成功将以数字化、网络化、个性化、定制化为特点的金属 3D 打印技术应用在医学、模具等工业领域中。现任中国机械工程学会增材制造(3D 打印)技术分会常务理事兼增材制造设计专委会主任,广东省增材制造协会会长、广东省 3D 打印标准化技术委员会主任、广东省激光行业协会监事长,美国激光协会(LIA)高级会员等。自 2013 年以来承担了包括科技部国际合作项目、国家自然科学基金项目、广东省重大专项等在内的 30 个项目。发表有关学术论文 280 余篇,获发明专利授权 45 项、实用新型专利授权 130 项。



王 迪 王迪,工学博士,华南理工大学副教授,英国伯明翰大学访问学者,最近 10 多年主要从事增材制造与激光加工方面的研究工作。现任广东省金属增材制造工程技术研究中心副主任,机械工程学会特种加工分会、增材制造(3D 打印)技术分会、焊接分会青年工作委员会委员,全国特种加工机床标准化技术委员会委员。主持国家自然科学基金项目 2 个,并主持广东省重大科技专项和广东省国际科技合作领域项目等项目多个。发表 SCI/EI 论文 50 多篇;获发明专利授权 32 项,实用新型专利授权 70 项;获颁软件著作权 5 项。获 2016 年度广东省科学技术奖科技进步类二等奖和 2016 年度广州市科技进步二等奖,并获得广东省高层次人才、广州市珠江科技新星等荣誉称号。



总序一

“中国制造 2025”提出通过三个十年的“三步走”战略,使中国制造综合实力进入世界强国前列。近三十年来,3D 打印(增材制造)技术是欧美日等高端工业产品开发、试制、定型的重要支撑技术,也是中国制造业创新、重点行业转型升级的重大共性需求技术。新的增材原理、新材料的研发、设备创新、标准建设、工程应用,必然引起各国“产学研投”界的高度关注。

3D 打印是一项集机械、计算机、数控、材料等多学科于一体的,新的数字化先进制造技术,应用该技术可以成形任意复杂结构。其制造材料涵盖了金属、非金属、陶瓷、复合材料和超材料等,并正在从 3D 打印向 4D、5D 打印方向发展,尺度上已实现 8 m 构件制造并向微纳制造发展,制造地点也由地表制造向星际、太空制造发展。这些进展促进了现代设计理念的变革,而智能技术的融入又会促成新的发展。3D 打印应用领域非常广泛,在航空、航天、航海、潜海、交通装备、生物医药、康复产业、文化创意、创新教育等领域都有非常诱人的前景。中国高度重视 3D 打印技术及其产业的发展,通过国家基金项目、攻关项目、研发计划项目支持 3D 打印技术的研发推广,经过二十多年培养了一批老中青结合、具有国际化视野的科研人才,国际合作广泛深入,国际交流硕果累累。作为“中国制造 2025”的发展重点,3D 打印在近几年得到了蓬勃发展,围绕重大需求形成了不同行业的示范应用。通过政策引导,在社会各界共同努力下,3D 打印关键技术不断突破,装备性能显著提升,应用领域日益拓展,技术生态和产业体系初步形成;涌现出一批具有一定竞争力的骨干企业,形成了若干产业集聚区,整个产业呈现快速发展局面。

华中科技大学出版社紧跟时代潮流,瞄准 3D 打印科学技术前沿,组织策划了本套“3D 打印前沿技术丛书”,并且,其中多部将与爱思唯尔(Elsevier)出版社一起,向全球联合出版发行英文版。本套丛书内容聚焦前沿、关注应用、涉猎广泛,不同领域专家、学者从不同视野展示学术观点,实现了多学科交叉融合。本套丛书采用开放选题模式,聚焦 3D 打印技术前沿及其应用的多个领域,如航空航天、



工艺装备、生物医疗、创新设计等领域。本套丛书不仅可以成为我国有关领域专家、学者学术交流与合作的平台,也是我国科技人员展示研究成果的国际平台。

近年来,中国高校设立了 3D 打印专业,高校师生、设备制造与应用的相关工程技术人员、科研工作者对 3D 打印的热情与日俱增。由于 3D 打印技术仅有三十多年的发展历程,该技术还有待于进一步提高。希望这套丛书能成为有关领域专家、学者、高校师生与工程技术人员之间的纽带,增强作者、编者与读者之间的联系,促进作者、读者在应用中凝练关键技术问题和科学问题,在解决问题的过程中,共同推动 3D 打印技术的发展。

我乐于为本套丛书作序,感谢为本套丛书做出贡献的作者和读者,感谢他们对本套丛书长期的支持与关注。

西安交通大学教授
中国工程院院士

2018 年 11 月



总序二

3D 打印是一种采用数字驱动方式将材料逐层堆积成形的先进制造技术。它将传统的多维制造降为二维制造,突破了传统制造方法的约束和限制,能将不同材料自由制造成空心结构、多孔结构、网格结构及功能梯度结构等,从根本上改变了设计思路,即将面向工艺制造的传统设计变为面向性能最优的设计。3D 打印突破了传统制造技术对零部件材料、形状、尺度、功能等的制约,几乎可制造任意复杂的结构,可覆盖全彩色、异质、功能梯度材料,可跨越宏观、介观、微观、原子等多尺度,可整体成形甚至取消装配。

3D 打印正在各行业中发挥作用,极大地拓展了产品的创意与创新空间,优化了产品的性能,大幅降低了产品的研发成本,缩短了研发周期,极大地增强了工艺实现能力。因此,3D 打印未来将对各行业产生深远的影响。为此,“中国制造 2025”、德国“工业 4.0”、美国“增材制造路线图”,以及“欧洲增材制造战略”等都视 3D 打印为未来制造业发展战略的核心。

基于上述背景,华中科技大学出版社希望由我组织全国相关单位撰写“3D 打印前沿技术丛书”。由于 3D 打印是一种集机械、计算机、数控和材料等于一体的新型先进制造技术,涉及学科众多,因此,为了确保丛书的质量和前沿性,特聘请卢秉恒、王华明、聂祚仁等院士作为顾问,聘请 3D 打印领域的著名专家作为编审委员会委员。

各单位相关专家经过近三年的辛勤努力,即将完成 20 余部 3D 打印相关学术著作的撰写工作,其中已有 2 部获得国家科学技术学术著作出版基金资助,多部将与爱思唯尔(Elsevier)联合出版英文版。

本丛书内容覆盖了 3D 打印的设计、软件、材料、工艺、装备及应用等全流程,集中反映了 3D 打印领域的最新研究和应用成果,可作为学校、科研院所、企业等



单位有关人员的参考书,也可作为研究生、本科生、高职高专生等的参考教材。

由于本丛书的撰写单位多、涉及学科广,是一个新尝试,因此疏漏和缺陷在所难免,殷切期望同行专家和读者批评与指正!

华中科技大学教授

2018 年 11 月

前言

目前,金属 3D 打印技术引起了社会各界的高度关注,以数字化、个性化、定制化为特点的 3D 打印技术正快速改变着传统的生产方式和生活方式,推动着制造技术的再一次革新。激光选区熔化(selective laser melting,SLM)是金属 3D 打印技术之一,其原理基于逐层累积的增材制造,与传统的“去除型”制造方式有着本质的区别。激光选区熔化 3D 打印技术相比其他金属 3D 打印技术的优势在于,成形件拥有更高致密度、更高尺寸精度和更好的表面质量,因此在精密金属 3D 打印领域中是最为前沿和最具潜力的技术,其主流发展趋势是装备设计和工艺研究。激光选区熔化 3D 打印技术的飞速发展,对工业及社会产生了巨大的推动作用,然而单独介绍激光选区熔化技术的专业书籍并不多,作者想通过此书帮助更多业内人士了解该项技术。

传统的零部件制造方式是通过车、铣、刨、磨、铸造、锻造、焊接等传统成形加工工艺来实现材料的加工。增材制造与传统的去除材料的加工不同,它不需要原坯与模具,直接根据图形数据,利用“逐层累积”将材料打印成形,可简化制造流程,缩短制造周期,节约制造材料,降低制造成本。激光选区熔化的成形工艺步骤包括:前期数据处理、激光选区熔化成形制造、后处理。前期数据处理作为产品数字化中最为关键的一步,又包含三维模型的设计、模型的近似处理、添加支撑、分层处理、路径规划。激光选区熔化 3D 打印技术的发展给制造业带来了无限活力,使得复杂零件的制造易于实现,为快速精密加工、快速模具制造、个性化医学产品制作、航空航天零部件生产等领域注入了新的动力。

本书具体内容如下:

第 1 章:绪论。主要介绍了几种金属零件 3D 打印技术,特别是激光选区熔化 3D 打印技术及其基本原理、基本工艺流程和激光选区熔化 3D 打印技术目前的发展情况。

第 2 章:激光选区熔化成形熔池热物理过程。主要介绍了激光与材料的相互作用以及微熔池的熔化与凝固。

第 3 章:激光选区熔化设备及其关键技术。主要介绍了激光选区熔化设备的系统组成,包括激光光路系统、振镜扫描系统、铺粉系统、气体循环系统等,并介绍了相关的关键技术。

第 4 章:激光选区熔化成形工艺。主要介绍了激光选区熔化成形工艺参数以及激光选区熔化成形件的主要性能指标,包括力学性能、残余应力、表面粗糙度、尺寸精度、硬度及致密度,列出了几种常见的激光选区熔化成形件的缺陷及其

成因。

第 5 章:激光选区熔化成形材料。主要介绍商品化以及研究中的金属粉末材料及其微观组织、性能。

第 6 章:面向激光选区熔化 3D 打印技术的设计约束及方法。主要介绍了激光选区熔化技术涉及的设计约束以及结构创新设计方法。

第 7 章:激光选区熔化数据处理。主要介绍了激光选区熔化数据处理的流程。

第 8 章:激光选区熔化 3D 打印技术与传统制造技术的结合。主要介绍了激光选区熔化技术与传统制造技术中的成形件后处理、非金属零件复合加工、零件质量检验技术的结合。

第 9 章:基于 SLM 的定制化医疗器具设计、制造及应用。主要介绍了激光选区熔化 3D 打印技术定制化医疗器具(如植入体、辅助器具)的设计、制造关键技术及相关应用案例。

第 10 章:复杂功能零件的设计、制造及应用。主要介绍了复杂功能零件的设计、制造关键技术及相关应用案例。

第 11 章:激光选区熔化 3D 打印技术的前沿与发展。主要介绍了大范围复杂金属构件成形技术、激光选区熔化微成形技术、金属零件的复合加工技术、多材料零件制造技术、材料-组织-性能定制化的零件制造、网络化制造技术。

本书由华南理工大学杨永强教授带领的增材制造团队成员共同参与完稿,在梳理团队过去研究工作的过程中,参阅了大量国内外的相关资料,在此向这些资料的作者表示诚挚的谢意。书中若有疏漏与不妥之处,敬请有关专家和读者批评指正。

作 者

2018 年 9 月

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 金属零件 3D 打印技术	(1)
1.2 激光选区熔化 3D 打印技术及其基本原理	(3)
1.3 基本工艺流程及影响因素	(4)
1.4 激光选区熔化 3D 打印技术最新进展	(7)
第 2 章 激光选区熔化成形熔池热物理过程	(12)
2.1 激光与材料作用的物理基础	(12)
2.2 SLM 成形中的传热、传质及对流	(13)
2.3 微熔池熔化与凝固	(15)
2.4 单熔道成形及参数	(15)
第 3 章 激光选区熔化设备及其关键技术	(19)
3.1 设备组成	(19)
3.2 激光光路系统光学原理	(20)
3.3 伺服电动机及密封成形室	(22)
3.4 铺粉装置	(23)
3.5 气体循环系统	(25)
3.6 控制系统	(26)
3.7 实时监控反馈	(26)
3.8 商品化激光选区熔化设备	(27)
第 4 章 激光选区熔化成形工艺	(31)
4.1 激光选区熔化成形工艺参数及其影响	(31)
4.2 SLM 成形件主要性能指标	(32)
4.3 激光选区熔化成形不稳定因素	(40)
4.4 SLM 成形件常见缺陷及其成因	(41)
第 5 章 激光选区熔化成形材料	(45)
5.1 商品化金属粉末材料	(45)
5.2 研究中的金属粉末材料	(52)
第 6 章 面向激光选区熔化 3D 打印技术的设计约束及方法	(57)
6.1 激光选区熔化 3D 打印技术涉及的设计约束	(57)
6.2 面向激光选区熔化 3D 打印技术的设计方法	(61)



6.3	基于拓扑优化方法的结构创新设计	(64)
6.4	基于有限元分析方法的结构创新设计	(66)
6.5	数学函数方法	(70)
第7章	激光选区熔化数据处理	(72)
7.1	数据处理流程	(72)
7.2	STL 数据处理	(73)
7.3	金属零件支撑添加	(74)
7.4	路径规划	(76)
7.5	激光选区熔化成形路径规划方法	(78)
第8章	激光选区熔化 3D 打印技术与传统制造技术的结合	(80)
8.1	后处理	(80)
8.2	非金属零件的复合加工	(83)
8.3	质量检验和表征	(84)
第9章	基于 SLM 的定制化医疗器具设计、制造及应用	(87)
9.1	生物医疗器具需求分析及关键技术	(87)
9.2	商业化应用案例	(88)
9.3	研究中的应用案例及待解决问题	(92)
第10章	复杂功能零件的设计、制造及应用	(94)
10.1	复杂功能零件需求分析及关键技术	(94)
10.2	大型设备开发	(96)
10.3	实时监测及反馈	(96)
10.4	在工业领域产业化应用案例	(97)
10.5	复杂功能零件潜在的研究课题	(98)
第11章	激光选区熔化 3D 打印技术的前沿与发展	(99)
11.1	大范围复杂金属构件成形	(99)
11.2	激光选区熔化微成形	(100)
11.3	金属零件的复合加工	(102)
11.4	多材料零件制造	(102)
11.5	材料-组织-性能定制化的零件制造	(103)
11.6	网络化制造	(103)
参考文献		(106)

第 1 章 绪 论

1.1 金属零件 3D 打印技术

3D 打印(three dimensional printing)技术是一种快速成形技术,曾在 20 世纪 80 年代被提出^[1],但当时由于成本过高、技术不先进等原因,并没有得到有效的推广和普及。随着科学技术日新月异的发展,金属零件 3D 打印技术逐渐成为制造业不可或缺的一部分。作为战略性新兴产业,3D 打印正在快速改变着传统的生产方式和生活方式。美国、德国等发达国家高度重视 3D 打印技术并予以积极推广。不少专家认为,以具备数字化、网络化、个性化、定制化等特点的 3D 打印技术为代表的新制造技术将推动第四次工业革命,英国《经济学人》杂志称 3D 打印技术为“第四次工业革命最具标志性的生产工具”。3D 打印主要流程如图 1-1 所示。3D 打印技术的源头可以追溯到快速成形(rapid prototyping)技术,从三维计算机辅助设计发展开始,人们就希望方便地将设计直接转化为实物。而 3D 打印技术,就是在计算机中将三维 CAD 模型分成若干层,通过 3D 打印设备在一个平面上按照三维 CAD 层图形,将塑料、金属甚至生物组织活性细胞等材料烧结或者黏合在一起,然后再一层一层地叠加起来。通过每一层不同图形的累积,最后形成一个三维物体^[2]。

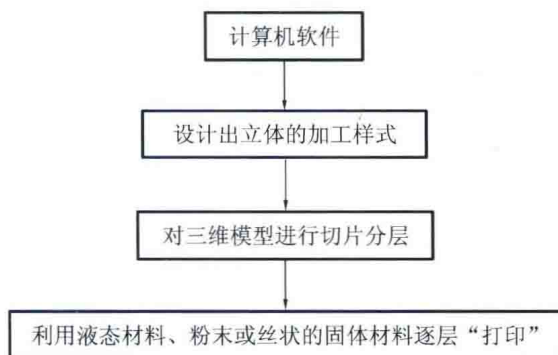


图 1-1 3D 打印主要流程

3D 打印技术是增材制造的主要实现形式,增材制造与传统的“去除型”制造方式有所区别,它不需要原坯与模具,直接根据计算机的图形数据,利用材料的增减和网络化的技术来改变材料的形状,简化制造的流程,缩短制造的时间,节约制

造的材料,减少资金费用,降低风险。金属零件 3D 打印技术作为整个 3D 打印体系中最为前沿和最有潜力的技术,是先进制造技术的重要发展方向。随着科技发展及推广应用需求的不断增多,3D 打印直接制造金属功能零件成为 3D 打印技术主要的发展方向。目前可用于直接制造金属功能零件的 3D 打印方法主要有:激光选区熔化(selective laser melting, SLM)、电子束选区熔化(electron beam selective melting, EBSM)、激光近净成形(laser engineered net shaping, LENS)等。

激光近净成形是一种由美国 Sandia 国家实验室首先提出的快速成形技术^[3],它的特点是能够直接制造形状结构复杂的金属功能零件或模具,易于加工熔点高、难加工的材料,并且能够实现异质材料零件的制造。激光近净成形主要的构成系统包括三部分,即送粉器、送粉头和保护气路^[4]。LENS 系统同轴送粉器结构如图 1-2 所示,送粉器包括粉末料箱和粉末定量送给机构,粉末的流量由步进电动机的转速决定。为增加金属粉末在自重作用下的流动性,将送粉器架设在 2.5 m 的高度上。从送粉器流出的金属粉末经粉末定量送给机构平均分成 4 份并通过软管流入粉头,金属粉末从粉头的喷嘴喷射到激光焦点所在位置,完成熔化堆积过程,全部的粉末路径由保护气体推动,保护气体将金属粉末与空气隔离,从而避免金属粉末氧化。

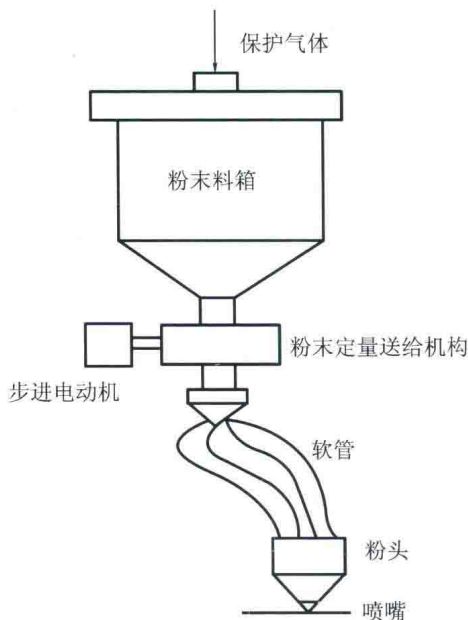


图 1-2 LENS 系统同轴送粉器结构示意图

电子束选区熔化^[5]是金属零件 3D 打印技术中与激光近净成形制造技术最为相似的零件制造手段,其加工的热源是高能电子束,通过操作偏转线圈进行扫描。在真空环境下以电子束为热源,以金属粉末为成形材料,通过不断在粉床上铺展金属粉末然后用电子束扫描熔化,使一个个小的熔池相互熔合并凝固,这样不断

进行形成一个完整的金属零件实体^[6]。电子束选区熔化工艺主要包括送粉、铺粉、熔化等工艺步骤^[7],在真空室中应该备有铺送粉机构、粉末回收箱和成形平台,应该具备电子枪系统、真空系统、电源系统和控制系统,其中控制系统包括扫描控制系统、运动控制系统、电源控制系统、真空控制系统和温度检测系统,如图 1-3 所示。

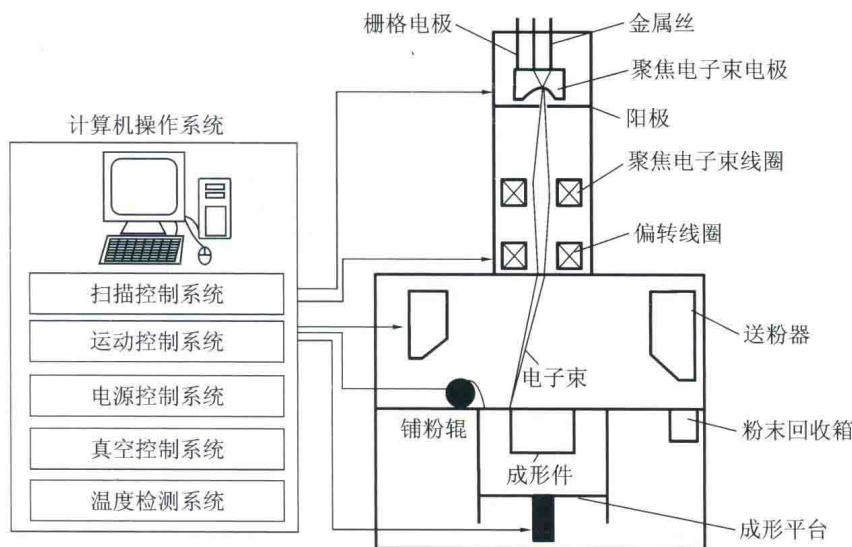


图 1-3 电子束选区熔化系统示意图

激光选区熔化 3D 打印是使金属粉末完全熔化,直接成形金属零件。在高功率密度激光器激光束开始扫描前,水平铺粉辊先把金属粉末平铺到加工室的基板上,然后激光束按当前层的轮廓信息选择性地熔化基板上的粉末,加工出当前层的轮廓,接下来可升降系统下降一个粉层厚度的距离,滚动铺粉辊再在已加工好的当前层上铺金属粉末,设备调入下一图层进行加工,如此层层加工,直到整个零件加工完毕。

1.2 激光选区熔化 3D 打印技术及其基本原理

激光选区熔化是金属 3D 打印领域的重要工艺,其发展经历了低熔点非金属材料烧结、低熔点包覆高熔点粉末烧结、高熔点粉末直接熔化成形等阶段。激光选区熔化 3D 打印技术是利用高能量的激光束,按照预定的扫描路径,扫描预先铺覆好的金属粉末,将其完全熔化,再经冷却、凝固后成形的一种技术^[8]。激光选区熔化 3D 打印技术具有以下几个特点:

(1) 成形原料一般为单一组分金属粉末,主要包括不锈钢、镍基高温合金、钛合金、钴铬合金、高强铝合金以及贵金属等;

(2) 采用细微聚焦光斑的激光束成形金属零件,成形的零件精度较高,表面经打磨、喷砂等简单后处理即可达到使用精度要求;

(3) 成形件的力学性能良好,一般拉伸性能可超过铸件水平,达到锻件水平;

(4) 进给速度较慢,导致成形效率较低,零件尺寸会受到铺粉工作箱的限制,不适合制造大型的整体零件。

激光选区熔化 3D 打印技术的基本原理^[9]是:先在计算机上利用 Pro/E、UG、CATIA 等三维造型软件设计出零件的三维实体模型,然后通过切片软件对该三维模型进行切片分层,得到各截面的轮廓数据,由轮廓数据生成填充扫描路径,设备按照这些填充扫描线,控制激光束选区熔化各层的金属粉末材料,逐步堆叠成三维金属零件^[10]。图 1-4 所示为其成形原理图。激光束开始扫描前,铺粉装置先把金属粉末平推到成形缸的基板上,激光束再按当前层的填充扫描线,选区熔化基板上的粉末,加工出当前层,然后成形缸下降一个层厚的距离,粉料缸上升一定厚度的距离,铺粉装置再在已加工好的当前层上铺好金属粉末,设备调入下一层轮廓的数据进行加工,如此层层加工,直到整个零件加工完毕。整个加工过程在通有惰性气体的加工室中进行,以避免金属在高温下与其他气体发生反应^[11]。

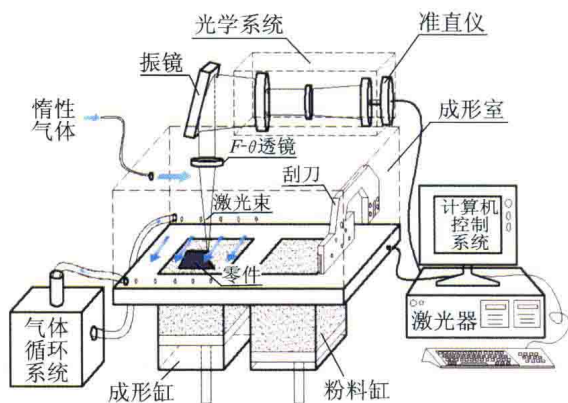


图 1-4 激光选区熔化成形原理图

作为金属零件 3D 打印技术的重要组成部分,激光选区熔化成形可以进行金属零件直接制造,不需要后处理。激光束快速熔化金属粉末并获得连续的熔道,可以直接获得几乎任意形状、具有完全冶金结合、高精度的近乎致密的金属零件。因此,激光选区熔化成形是极具发展前景的金属零件 3D 打印技术,其应用范围已经扩展到航空航天、微电子、医疗、珠宝首饰等行业。

1.3 基本工艺流程及影响因素

1.3.1 基本工艺流程

激光选区熔化成形的基本工艺流程如图 1-5 所示。首先利用 CAD 设计软件