



国家科学技术学术著作出版基金资助  
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**

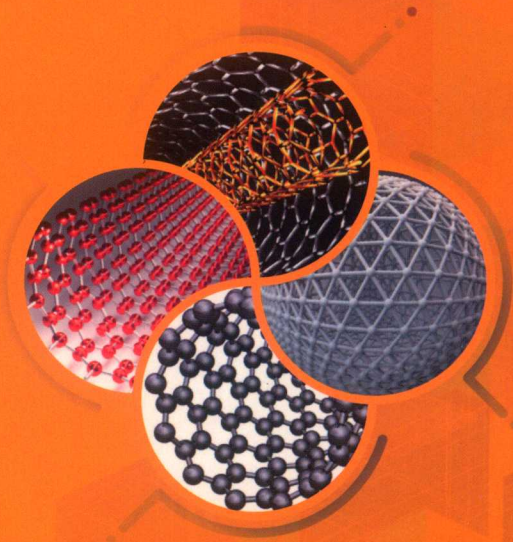
丛书顾问◎卢秉恒 丛书主编◎史玉升

# 3D打印材料

(上册)

史玉升 闫春泽 周燕 著  
吴甲民 汪艳 余圣甫 著

3D DAYIN CAILIAO



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>



国家科学技术学术著作出版基金资助  
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**

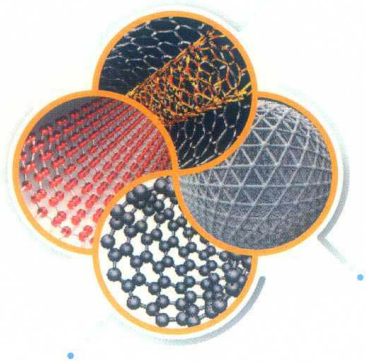
丛书顾问◎卢秉恒 丛书主编◎史玉升

# 3D打印材料

(上册)

史玉升 闫春泽 周 燕 著  
吴甲民 汪 艳 余圣甫 著

3D DAYIN GAILIAO



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

中国·武汉

## 内 容 简 介

本书全面、系统地介绍了3D打印材料的制备理论和技术及其应用。其主要内容包括3D打印材料概述、3D打印高分子材料——粉材、3D打印高分子材料——液材、3D打印高分子材料——丝材、3D打印金属材料、3D打印陶瓷材料、3D打印材料应用案例等。本书具有系统性、全面性、普遍性和新颖性,图文并茂,既有理论研究,又有实际应用,是一本对3D打印材料的研究和应用极具实用价值的参考书。

本书可供3D打印领域的工程技术人员阅读,也可作为相关专业师生的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

3D打印材料:上、下册/史玉升等著. —武汉:华中科技大学出版社,2019.3  
(3D打印前沿技术丛书)  
ISBN 978-7-5680-5028-9

I. ①3… II. ①史… 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052311号

3D打印材料(上、下册)  
3D Dayin Cailiao(Shang、XiaCe)

史玉升 闫春泽 周 燕 著  
吴甲民 汪 艳 余圣甫

策划编辑:张少奇

责任编辑:程 青

封面设计:原色设计

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)  
武汉市东湖新技术开发区华工科技园

电话:(027)81321913

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:33.5

字 数:682千字

版 次:2019年3月第1版第1次印刷

定 价:280.00元(含上册、下册)



华中出版

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 Authors 作者简介



**史玉升** 华中科技大学“华中学者”领军岗特聘教授。曾任华中科技大学材料科学与工程学院副院长、党委书记,华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室副主任;现任中央军委科技委国防科技创新特区主题专家组首席科学家、全国增材制造标准化技术委员会专用材料工作组副主任委员、中国航天科技集团有限公司增材制造工艺技术中心专家委员会主任、数字化材料加工技术与装备国家地方联合工程实验室(湖北)主任等职务。入选中国十大科技进展1项,获国家技术发明奖二等奖1项、国家科学技术进步奖二等奖2项、省部级一等奖和二等奖各5项、国际发明专利奖2项。获中国发明创业奖特等奖暨当代发明家、中国科学十大杰出创新人物称号。获十佳全国优秀科技工作者提名奖、武汉市科技重大贡献个人奖、湖北五一劳动奖章等。所领导的团队分别入选湖北省和教育部创新团队,指导的研究生撰写的论文获全国优秀博士学位论文提名1篇、湖北省优秀博士学位论文5篇、湖北省优秀硕士学位论文3篇。



**闫春泽** 华中科技大学教授。2010—2015年英国埃克塞特大学(University of Exeter)博士后(Research Fellow),2016年被评为湖北省百人计划特聘教授,2017年破格晋升为华中科技大学教授,现任华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室副主任、快速制造中心主任,华中科技大学“4D打印技术”学术前沿青年团队负责人。长期从事增材制造(包括3D打印、4D打印等)材料及其成形理论与应用研究,获国家技术发明奖二等奖、国家科学技术进步奖二等奖、湖北省技术发明奖一等奖、中国机械工业一等奖各1项,入选中国十大科技进展1项。



**周燕** 中国地质大学(武汉)副教授,入选“地大学者”青年优秀人才。现任中国机械工程学会高级会员、中国光学学会激光加工专业委员会委员、中国航空学会会员、湖北3D打印产业技术创新战略联盟副秘书长。主要从事金属3D打印材料、工艺、性能及应用的研究工作。主持国家自然科学基金、广东省重大科技专项、湖北省自然科学基金等国家及省部级科研项目10余项,发表论文30余篇(ESI高被引论文2篇),获中国发明专利10项,参编著作3部。



## About Authors

### 作者简介



**吴甲民** 华中科技大学副教授、硕士生导师,入选湖北省青年科技晨光计划、武汉东湖新技术开发区“3551 光谷人才计划”、华中科技大学材料科学与工程学院“青年优材计划”。现任中国工程院中国 3D 打印材料及应用发展战略研究咨询项目无机材料组成员,中国机械工程学会增材制造(3D 打印)技术分会会员,湖北省硅酸盐学会第六届理事会理事,安徽高岭土工程技术研究中心副主任,华中科技大学材料学院分团委副书记,华中科技大学快速制造中心副主任等职务。主要从事陶瓷增材制造技术及其应用的研究工作。主持国家重点研发计划项目课题、航空发动机及燃气轮机重大专项基础研究项目子课题、国家自然科学基金项目等多项科研项目,参与出版专著 1 部,发表学术论文 50 余篇,获中国发明专利 8 项。



**汪艳** 武汉工程大学教授、硕士生导师,主要从事 3D 打印高分子材料的研究,主持国家工业和信息化部、广东省科学技术厅、湖北省经济和信息化厅等省部级科研项目 10 余项,企业合作项目 30 余项,发表论文 60 余篇,获中国发明专利 12 项,获国家自然科学基金二等奖、湖北省科学技术进步奖三等奖各 1 项。



**余圣甫** 华中科技大学教授、博士生导师。现任湖北省暨武汉市焊接学会常务理事、焊接学术委员会主任委员,中国机械工业教育协会材料成型及控制工程学科教学委员会焊接分委员会委员。主要从事金属材料焊接冶金过程、提高金属材料强韧性的方法、3D 打印装备与工艺技术、电弧熔丝 3D 打印专用丝材、3D 打印金属构件组织转变行为等方面的研究工作。承担并完成国家自然科学基金项目,总装预研项目、“863”计划项目、湖北省科技攻关项目等 10 余项。目前正承担国家重点研发计划项目“高性能大型金属构件多电弧协同增材制造装备与工艺”。获省部级科学技术进步奖 3 项,获中国发明专利 10 余项,发表科研论文 100 余篇。



# 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 打印在近几年取得了蓬勃发展,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。

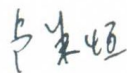
华中科技大学出版社紧跟时代潮流,瞄准 3D 打印科学技术前沿,组织策划了本套“3D 打印前沿技术丛书”,并且,其中多部将与爱思唯尔(Elsevier)出版社一起,向全球联合出版发行英文版。本套丛书内容聚焦前沿、关注应用、涉猎广泛,不同领域专家、学者从不同视野展示学术观点,实现了多学科交叉融合。本套丛书采用开放选题模式,聚焦 3D 打印技术前沿及其应用的多个领域,如航空航天、

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、网格结构及梯度功能结构等,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、梯度功能材料,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,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

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'LBP'.

2018年11月

# 前 言

3D 打印,属于增材制造,是近三十年来全球先进制造领域兴起的一项集机械、计算机、数控和材料等多学科于一体的、全新的数字化制造技术,它将传统的面向制造工艺的零件设计变为面向性能的全新设计,被称为当今制造业的一场革命。

华中科技大学从 1991 年开始进行 3D 打印技术的理论与应用研究工作,是中国开展此项技术研究最早的单位之一。截至目前,华中科技大学已成功研发四种 3D 打印工艺(包括薄材叠层、光固化、激光选区烧结和激光选区熔化)的系列装备与配套材料,并实现产业化,研究成果在国内外得到广泛应用。获国家科学技术进步奖二等奖 2 项和国家技术发明奖二等奖 1 项,省部级一等奖 5 项,省部级二等奖 5 项,发明专利 91 项(包括美、日发明专利 4 项),相关研究成果入选 2011 年中国十大科技进展。

3D 打印技术的核心是装备和材料。在我国,3D 打印装备经过十几年的发展已形成了较成熟的系列产品,部分指标达国际先进水平。但随着 3D 打印技术发展及其应用领域的不断扩展,其材料问题日渐凸显。目前,3D 打印材料有高分子、金属、陶瓷及复合材料等,而得到实际应用的也就 100 多种,且性能有限、价格昂贵。因此,现有 3D 打印材料已无法满足实际应用的需求,已成为制约 3D 打印技术发展的主要瓶颈之一。针对上述 3D 打印材料存在的问题,华中科技大学快速制造团队在国家自然科学基金重点项目,国家重点研发计划,国家科技重大专项 02、04 专项,国家科技支撑计划,欧盟第七框架计划等多项国家、国际合作重点项目的资助下,开展了长期的基础和应用研究,开发出多种新型 3D 打印材料,研究出其制备方法,获国家发明专利 20 余项,部分材料实现了产业化,在国内外得到广泛应用。例如,在广东省“3D 打印高分子复合材料研发及产业化”项目的资助下,该项目研发的 3D 打印高分子材料在广东银禧科技股份有限公司实现产业化,形成多条 3D 打印粉材和丝材生产线,产品除满足国内市场需求外,还大量出口至美国、德国等国家。为了培养相关领域的科技人才,更深入地研究 3D 打印材料技术,本书作者归纳和总结了华中科技大学快速制造团队在该领域的研究成果,出版了本专著。

本书对 3D 打印高分子、金属、陶瓷及其复合材料的制备、成形机理与工艺进

行了全面、系统的论述。全书共分七章,第 1 章论述 3D 打印材料概况,主要包括 3D 打印技术和材料的研发现状;第 2 章论述 3D 打印高分子粉材,主要包括尼龙(PA)、聚碳酸酯(PC)、聚苯乙烯(PS)及其复合材料等;第 3 章论述 3D 打印高分子液材,主要包括光敏树脂及其复合材料;第 4 章论述 3D 打印高分子丝材,主要包括 ABS 塑料及其复合材料等;第 5 章论述 3D 打印金属粉材及丝材,主要包括钛、镍、铁基合金粉材和丝材;第 6 章论述 3D 打印陶瓷材料,主要包括  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{ZrO}_2$ 、高岭土及其复合材料;第 7 章论述 3D 打印应用案例,主要包括高分子、金属及陶瓷材料在工业及医学上的典型应用。

在撰写本书的过程中,作者以几十年来从事 3D 打印材料技术研究的科研成果为基础,兼顾不同知识背景读者的要求,既保证内容新颖,反映最新研究成果,又深入探讨理论知识,介绍实际应用案例。因此,本书既适合不同领域的工程技术人员阅读,又可作为相关专业师生的参考书。

本书集中反映了华中科技大学快速制造团队的相关成果,这些成果是由上百人的研究团队经过几十年的长期坚持研究而取得的,本书作者史玉升、闫春泽、周燕、吴甲民、汪艳、余圣甫等只是该研究团队的部分代表。首先,衷心地感谢华中科技大学快速制造中心创始人黄树槐教授的指导及其建立的良好研究平台!本书撰写过程中,参考了本团队部分研究生的论文和成果,他们是魏青松、刘洁、文世峰、李湘生、林柳兰、甘志伟、黄必武、刘锦辉、鲁中良、杨劲松、章文献、李瑞迪、刘海涛、王黎、张升、刘凯、赵晓、朱伟、李伟、张琳琳、唐富兰、夏思婕、徐文武、唐萍、程迪、贺文婷、晋家兵、行舒乐等,在此向这些研究生表示感谢!另外,博士后程立金、刘荣臻、李昭青,研究生季宪泰、马高、吴雪良、陈安南、陈敬炎、代轶励、孙严、陈鹏、刘珊珊、肖欢、陈双、马伊欣、傅华、唐明晨、周汪兵、徐中凤等参与了编写工作。

由于本书是首本以 3D 打印材料作为主线撰写的学术专著,内容广泛,有些内容是本团队的最新研究成果,而有些研究工作还在继续,我们对该技术的认识还在不断深化之中,对一些问题的理解还不够深入,加之作者的学术水平和知识有限,因此书中的疏漏和缺陷在所难免,殷切地期望同行专家和读者批评指正。

史玉升

2017 年 6 月于武汉

# 上册目录

<b>第 1 章 3D 打印材料概述</b> .....	(1)
1.1 国内外 3D 打印技术研究现状 .....	(1)
1.2 国内外 3D 打印材料研究现状 .....	(3)
1.2.1 高分子材料 .....	(3)
1.2.2 金属材料 .....	(4)
1.2.3 陶瓷材料 .....	(6)
参考文献 .....	(6)
<b>第 2 章 3D 打印高分子材料——粉材</b> .....	(8)
2.1 高分子及其复合粉材激光选区烧结成形机理 .....	(8)
2.1.1 激光对高分子粉材的加热过程 .....	(10)
2.1.2 高分子粉材 SLS 成形机理 .....	(15)
2.1.3 高分子及其复合粉材特性对 SLS 成形的影响 .....	(19)
2.2 高分子及其复合粉材的制备、组成及表征 .....	(37)
2.2.1 高分子粉材的制备 .....	(37)
2.2.2 SLS 高分子粉材的组成 .....	(40)
2.2.3 SLS 高分子粉材的表征 .....	(44)
2.3 尼龙 12 粉材 .....	(45)
2.3.1 尼龙 12 粉材制备工艺 .....	(46)
2.3.2 尼龙 12 粉材的 SLS 工艺特性 .....	(54)
2.3.3 尼龙 12 粉材的 SLS 制件性能 .....	(64)
2.4 尼龙 12 复合粉材 .....	(65)
2.4.1 尼龙 12/累托石复合粉材 .....	(66)
2.4.2 尼龙 12/纳米二氧化硅复合粉材 .....	(70)
2.4.3 尼龙 12/铝复合粉材 .....	(80)
2.4.4 尼龙 12/铜复合粉材 .....	(94)
2.4.5 尼龙 12/钛酸钾晶须复合粉材 .....	(99)
2.4.6 尼龙 12/碳纤维复合粉材 .....	(109)
2.5 苯乙烯-丙烯腈共聚物粉材 .....	(118)
2.5.1 苯乙烯-丙烯腈共聚物粉材的制备与表征 .....	(118)
2.5.2 苯乙烯-丙烯腈共聚物粉材的 SLS 成形及后处理 .....	(119)
2.5.3 苯乙烯-丙烯腈共聚物粉材 SLS 制件性能 .....	(120)

2.6	高抗冲聚苯乙烯粉材 .....	(122)
2.6.1	高抗冲聚苯乙烯粉材的 SLS 成形工艺特性 .....	(122)
2.6.2	高抗冲聚苯乙烯粉材的 SLS 制件性能 .....	(124)
2.6.3	后处理工艺对高抗冲聚苯乙烯 SLS 制件性能的影响 .....	(125)
2.7	聚碳酸酯粉材 .....	(129)
2.7.1	聚碳酸酯粉材的 SLS 成形工艺及性能 .....	(130)
2.7.2	后处理工艺对聚碳酸酯制件性能的影响 .....	(133)
2.8	ABS 粉材 .....	(135)
2.8.1	ABS 材料的基本特性 .....	(135)
2.8.2	ABS 树脂粉材烧结性能 .....	(135)
	参考文献 .....	(137)
<b>第 3 章</b>	<b>3D 打印高分子材料——液材 .....</b>	<b>(139)</b>
3.1	光固化成形光敏树脂概述 .....	(139)
3.1.1	光固化成形材料 .....	(142)
3.1.2	光固化反应机理 .....	(147)
3.1.3	光敏树脂和紫外光源的特性参数 .....	(156)
3.1.4	光敏树脂材料特性及其光固化特性 .....	(158)
3.2	光固化实体液材 .....	(165)
3.2.1	阳离子光固化体系中苜醇促进剂 .....	(166)
3.2.2	碘鎓盐及其光引发剂 .....	(175)
3.2.3	氧杂环丁烷光固化动力学研究 .....	(191)
3.2.4	阳离子体系实体液材的配制与性能研究 .....	(195)
3.2.5	混杂体系实体液材的配制与性能研究 .....	(207)
3.2.6	自由基体系实体液材的配制与性能研究 .....	(210)
3.3	光固化实体液材中的低聚物 .....	(213)
3.3.1	聚丙二醇二缩水甘油醚二丙烯酸酯 .....	(214)
3.3.2	低黏度氨基甲酸酯丙烯酸酯 .....	(218)
3.4	光固化支撑液材的低聚物 .....	(227)
3.4.1	水性聚氨酯丙烯酸酯的合成与性能 .....	(227)
3.4.2	聚乙二醇二丙烯酸酯的合成与性能 .....	(237)
3.4.3	低聚物配制支撑液材 .....	(239)
3.5	改性光固化成形液材 .....	(244)
3.5.1	纳米二氧化硅改性光固化成形液材 .....	(244)
3.5.2	环氧丙烯酸酯增韧光敏树脂液材 .....	(253)
3.5.3	新型脂环环氧丙烯酸酯的合成与应用 .....	(260)
	参考文献 .....	(266)

# 第 1 章 3D 打印材料概述

3D 打印也称为增材制造(additive manufacturing, AM)。3D 打印技术无需传统的刀具、夹具及多道加工工序,它利用三维(3D)设计数据在设备上由程序控制,自动、快速、精确地制造出任意复杂结构的零部件,从而实现设计和制造的自由化和数字化。该技术不仅可成形传统加工方法难以制造的复杂结构,还可大幅减少加工工序,缩短加工周期。如同蒸汽机、福特汽车流水线引发的工业革命一样,3D 打印技术也被视为“一项将要改变世界的技术”,并引起全球关注。3D 打印技术正在改变我们传统的生产和生活方式。随着 3D 打印技术应用的不断拓展,它将不再局限于制造业领域,而会成为社会创新的工具,使得人人都可以成为创造者,从而推动创新型社会的发展。

世界科技强国和新兴国家都将这一技术作为未来产业发展的新的增长点加以培育和支持,欧美等发达国家纷纷制定了发展 3D 打印技术的国家战略,努力抢占未来科技产业的制高点,通过科技创新推动社会发展。我国自 20 世纪 90 年代初开始对 3D 打印技术进行研究和产业化。当前,我国 3D 打印装备技术水平基本与国外先进水平相当,但在 3D 打印用的材料方面落后于国外先进水平。在 3D 打印产业化方面,还缺少生产专用材料的企业。这些因素一方面导致我国难以促进强有力的产业化发展,另一方面也制约了我国制造业创新能力的提升。目前我国制造业产值虽跃居世界第一位,但主要集中在中低端产品,并且出现产过于求的现象。高端产品及相关技术还受制于人,其逐渐成为制约我国经济持续健康发展的短板。转变经济发展方式是我国经济发展面临的首要问题。而 3D 打印技术的发展给我们提供了一个很好的契机。习近平总书记谈到 3D 打印技术时,要求“我们必须高度重视,密切跟踪,迎头赶上”。

## 1.1 国内外 3D 打印技术研发现状

国外 3D 打印技术主要集中在欧美地区,其中美国是 3D 打印技术的起源地,也是对此技术研究最广泛的国家。美国德克萨斯大学奥斯汀分校的 Laboratory for Freeform Fabrication 是世界上最早成立的 3D 打印研究中心之一,研究领域涵盖了 3D 打印技术的各个方面。美国德克萨斯大学埃尔帕索分校设立的 W. M. Keck Center for 3D Innovation 联合新墨西哥大学、扬斯敦州立大学、洛克希德·马丁公司、诺斯罗普·格鲁曼公司、rp+m 和 Stratasys 公司,致力于面向航空航天

系统的 3D 打印技术研发。美国宾夕法尼亚州立大学联合 Battelle Memorial Institute 和 Sciaky Corporation 成立了 Center for Innovative Materials Processing Through Direct Digital Deposition, 它侧重于金属、高分子等材料的设计及工业化应用研究。此外, 欧美其他发达国家和地区的科研单位都设立了 3D 打印研究中心。例如, 英国谢菲尔德大学设立了 Centre for Advanced Additive Manufacturing, 重点研究增材制造零件结构设计、喷墨打印、生物材料激光成形、航空材料激光选区熔化成形、激光烧结新材料等。英国诺丁汉大学成立了 EPSRC Centre for Innovative Manufacturing in Additive Manufacturing, 针对多功能 3D 打印技术、3D 打印材料体系设计等方面进行创新突破。英国埃克塞特大学设立的 Centre for Additive Layer Manufacturing 致力于解决 3D 打印技术与工业应用结合的难题。德国弗劳恩霍夫激光研究所成立了弗劳恩霍夫增材制造联盟, 着眼于金属、高分子、陶瓷及生物材料的 3D 打印成形, 其下属的 11 个研究中心遍布德国。法国设立了 Center for Technology Transfers in Ceramics(CTTC), 利用喷墨打印、黏结剂喷射、陶瓷直接沉积等 3D 打印技术成形难加工的脆性材料。比利时鲁汶大学机械工程学院则针对 3D 打印技术种类进行了深入研究, 并应用于实际生产。除了上述欧美国家外, 澳大利亚莫纳什大学成立了 Monash Centre for Additive Manufacturing, 该中心拥有激光选区熔化设备 Concept Laser X-Line 1000, 并在 2015 年打印出世界上第一个全金属航空发动机。在亚洲地区, 如新加坡也成立了 3D 打印中心, 研究面向未来制造、海洋应用、生物医疗和建筑打印, 几乎囊括了金属、生物等各个领域的 3D 打印设备, 致力于成为东南亚的 3D 打印中心支点。

我国也积极筹建了一批 3D 打印技术创新中心、服务中心等。例如, 由 3D 打印领域的专家学者卢秉恒院士牵头, 聚集了清华大学、北京航空航天大学、西安交通大学、西北工业大学、华中科技大学等单位 3D 打印领域的领军人物, 集成国内外研发力量, 在南京成立了 3D 打印研究院, 将重点开展航空制造、航天科技、汽车研发、生物制造、医疗康复等领域的 3D 打印工艺、装备、材料、应用等产业化技术研发, 逐渐实现技术转化与孵化。天津、青岛等地先后建立了 3D 打印创新中心, 围绕地方产业特点, 打造展示体验中心、加工服务中心和技术研发中心, 展示并传播全球 3D 打印及产业发展的前沿技术和动态, 促进产业化发展。北京建立了数字化医疗 3D 打印协同创新联盟, 重点突破数字化医疗 3D 打印材料、工艺与装备、工具软件等关键技术, 致力于建立国内首创和世界一流的“数字化医疗 3D 打印协同创新中心”与“服务平台”。上海联合 5 个研发团队成立 3D 打印技术创新中心, 结合本土的行业应用需求, 推动 3D 打印技术在多领域的应用。贵州省在贵阳经济技术开发区正式建成了 3D 打印技术中心, 为经济技术开发区的装备制造类企业提供工业设计及技术创新平台和快速制造服务。长沙市建立了 3D 打印技术产业基地, 依托装备制造企业重点攻关 3D 打印材料与装备关键技术, 促进 3D 打印



产业链的完善,带动 3D 打印技术的不断突破和发展。

## 1.2 国内外 3D 打印材料研发现状

3D 打印技术完全改变了传统制造业的生产方式和原理,它是对传统制造模式的一种颠覆。当前,3D 打印材料成为限制 3D 打印技术发展的主要瓶颈,同时也是 3D 打印技术突破的关键和难点所在,只有进行更多新材料的开发才能拓展 3D 打印技术的应用领域。目前,3D 打印材料主要包括聚合物材料、金属材料、陶瓷材料和复合材料等。3D 打印材料是 3D 打印技术发展的重要基础,在某种程度上,材料的发展程度决定着 3D 打印的应用广度。下面将对高分子材料、金属材料、陶瓷材料分别进行介绍。

### 1.2.1 高分子材料

用于 3D 打印的高分子材料主要是热塑性聚合物及其复合材料,热塑性聚合物又可分为非结晶和结晶两种。其中,非结晶聚合物通常用于制备对强度要求不高但具有较高尺寸精度要求的制件,主要有聚碳酸酯(polycarbonate,PC)、聚苯乙烯(polystyrene,PS)、高抗冲聚苯乙烯(high impact polystyrene,HIPS)和聚甲基丙烯酸甲酯(poly(methyl methacrylate),PMMA)。1993 年,美国 DTM 公司首次将聚碳酸酯粉末用于熔模铸造零件的成形,华中科技大学的史玉升、汪艳等采用环氧树脂体系对聚碳酸酯制件进行后处理,经过后处理的聚碳酸酯制件的力学性能有了很大的提高,可用作性能要求不太高的功能件。EOS 公司和 3D Systems 公司分别于 1998 年、1999 年推出了以聚苯乙烯为基体的商业化粉末烧结材料 PrimeCast 和 CastForm,这种烧结材料同聚碳酸酯相比,烧结温度较低,烧结变形小,成形性能优良,更加适合熔模铸造工艺,因此聚苯乙烯粉末逐渐取代了聚碳酸酯粉末在熔模铸造方面的应用。香港大学和南昌航空大学通过制备复合粒子来增强聚苯乙烯制件的性能。华中科技大学的史玉升先后通过浸渗环氧树脂的后处理方法和制备聚苯乙烯/尼龙(polyamide,PA)复合材料来提高聚苯乙烯制件的强度,最终制件都可以满足一般功能件的要求。虽然聚苯乙烯的成形温度低、精度高,但制件的强度较低,不易成形复杂、薄壁零件。因此杨劲松等提出使用 HIPS 粉末材料来制备精密铸造用树脂模,其制件的力学性能比聚苯乙烯制件的高得多,可以用来成形具有复杂、薄壁结构的零件。华中科技大学史玉升等同样先由 3D 打印制备 HIPS 初始形坯,再通过浸渗环氧树脂的后处理方法,制备了精度较高,力学性能可以满足一般要求的 HIPS 功能零件。

结晶聚合物制件则具有较高的强度,尼龙是 3D 打印最为常用的结晶聚合物,其经激光烧结能制得高致密度、高强度的制件,可以直接用作功能件,因此受到广