



国防科技图书出版基金



Micro Metal Droplet Based
3D Printing Technology

基于均匀金属微滴喷射的 3D打印技术

齐乐华 罗俊 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

基于均匀金属微滴喷射的 3D 打印技术

Micro Metal Droplet Based 3D Printing Technology

齐乐华 罗 俊 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

基于均匀金属微滴喷射的3D打印技术 / 齐乐华,
罗俊著. —北京:国防工业出版社,2019.4

ISBN 978-7-118-11776-9

I. ①基… II. ①齐… ②罗… 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015235号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100048)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 16 $\frac{3}{4}$ 字数 292千字

2019年4月第1版第1次印刷 印数 1—2000册 定价 108.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

致 读 者

本书由中央军委装备发展部国防科技图书出版基金资助出版。

为了促进国防科技和武器装备发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。这是一项具有深远意义的创举。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在中央军委装备发展部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由中央军委装备发展部国防工业出版社出版发行。

国防科技和武器装备发展已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。开展好评审工作,使有限的基金发挥出巨大的效能,需要不断摸索、认真总结和及时改进,更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授、以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第七届评审委员会组成人员

| | | | | |
|-----------|-----|-----|-----|-----|
| 主任委员 | 潘银喜 | | | |
| 副主任委员 | 吴有生 | 傅兴男 | 杨崇新 | |
| 秘书长 | 杨崇新 | | | |
| 副秘书长 | 邢海鹰 | 谢晓阳 | | |
| 委员 | 才鸿年 | 马伟明 | 王小谟 | 王群书 |
| (按姓氏笔画排序) | 甘茂治 | 甘晓华 | 卢秉恒 | 巩水利 |
| | 刘泽金 | 孙秀冬 | 芮筱亭 | 李言荣 |
| | 李德仁 | 李德毅 | 杨伟 | 肖志力 |
| | 吴宏鑫 | 张文栋 | 张信威 | 陆军 |
| | 陈良惠 | 房建成 | 赵万生 | 赵凤起 |
| | 郭云飞 | 唐志共 | 陶西平 | 韩祖南 |
| | 傅惠民 | 魏炳波 | | |

序

基于均匀金属微滴喷射的增材制造(3D 打印)技术是在数字化喷印基础上发展起来的一种新技术,它是以均匀金属熔滴为基本成形单元,依据零件形状特征逐点、逐层“堆积”而实现三维结构的快速打印技术。这种技术具有无需专用原材料和昂贵专用设备以及成本低等优势,有望在航空、航天、微电子及民用领域的微小复杂金属件、微小非均质件、微小功能器件及微电子器件快速制造中得到应用,是一种颇具发展前景的3D 打印技术。然而,金属微滴喷射、沉积及成形过程涉及流体动力学、冶金凝固学、材料、控制等科学领域,包括金属微滴喷射多场耦合与过程控制、沉积铺展传热与精准定位、快速凝固与三维成形控制等诸多理论和技术问题,本书是对均匀金属微滴喷射理论与工艺应用的系统总结。

均匀金属液滴喷射3D 打印技术的研究在国际上起步较早。从20世纪90年代开始,美国麻省理工学院、加州大学欧文分院、美国东北大学、日本大阪大学、加拿大多伦多大学、荷兰屯特大学等先后对均匀金属微滴喷射及3D 打印技术开展了理论和试验研究。国内对金属微滴喷射及沉积成形技术的研究始于21世纪初期,西北工业大学、哈尔滨工业大学等开始对金属微滴近净成形工艺进行探索,近年来,西安交通大学、大连理工大学、北京工业大学、华中科技大学等陆续对均匀金属微滴喷射及其成形技术展开研究。但国内外关于均匀金属液滴喷射技术报道均散见于期刊和其他专著中的部分章节,至今未有系统论述均匀金属微滴喷射及3D 打印成形理论与应用的书籍出版。急需有一部全面揭示均匀金属微滴喷射、沉积及成形内在规律并能指导实际应用的学术专著,以促进金属件均匀液滴3D 打印技术发展,为降低金属3D 打印生产成本、扩大该技术的应用领域奠定基础。

齐乐华教授研究团队对均匀金属液滴喷射及其3D 打印技术理论与应用进行了10余年的潜心研究,提出了波形脉冲作用下多尺度微滴可控喷射新思路,突破了多材质均匀微滴按需喷射、均匀微滴按需成形控制等关键技术,开发了多台套适用不同应用领域的金属微熔滴喷射及沉积制造试验平台,并指导多名博士和硕士对均匀金属微滴喷射及沉积的共性规律进行了深入系统的研究,在国内外重要期刊上发表了80多篇高水平论文,授权10余项发明专利,取得了诸多研究成果。

本书是著者在多项国家“863”重点项目、国防基础科研、国家自然科学基金和省部级基金资助下,对均匀微滴喷射 3D 打印成形相关理论与技术问题进行长期深入系统研究的成果结晶,本书系统、全面地论述了均匀金属液滴喷射及其 3D 打印技术的相关理论和应用情况,包括金属微滴喷射、飞行与沉积铺展过程所涉及的基础理论,涉及工艺参数对沉积微滴形状、成形轨迹和成形件内部组织及力学性能的影响机制等。本书是目前国内第一部系统描述基于均匀金属液滴喷射 3D 打印技术的学术专著,具有重要的学术价值。

本书理论联系实际,针对性强,内容丰富新颖,对相关领域的科学研究人员、工程技术人员及相关专业的教师、学生均具指导意义。



2018 年 10 月 30 日

前 言

3D 打印技术被誉为第三次工业革命的重大标志,并已在国防、民用等领域展现出广阔的应用前景。基于均匀金属微滴喷射的 3D 打印技术是近年来提出的一种增材制造新技术,它是利用喷墨打印和“离散-堆积”原理,通过精确控制均匀金属微滴的定点喷射及逐步沉积成形,达到复杂件的低成本制造目的。它可用于微小金属件、非均质件、微小功能器件、微小功能器件的快速制备以及航空、航天、武器装备和微电子封装等领域,而且其由于无须昂贵设备,具有低成本、柔性化、原材料来源广泛等特点,在国防科技和民用领域也具有广泛的发展前景。

金属微滴喷射与打印技术包括均匀金属微滴的形成、喷射、沉积凝固以及 3D 成形等过程,并涉及非线性流固耦合、非线性动力学、金属的传热与凝固、多场耦合与过程控制等诸多科学技术问题,理论和应用研究难度较大。尽管相关技术和理论已有诸多报道,但作为一项刚起步不久的新技术,目前尚无一部系统论述均匀金属微滴成形原理与技术、揭示其内在规律以及指导实际应用的学术专著出版。

本书全面系统地介绍了高温条件下,微小金属微滴产生、飞行与沉积成形过程所涉及的科学问题及关键技术,建立了金属微滴喷射、飞行以及堆积成形过程的理论模型,揭示了各试验参数对均匀金属微滴喷射过程及制件最终性能的影响机制。书中还介绍了作者设计开发的多台具有自主知识产权的均匀金属微滴 3D 打印成形设备,阐述了均匀金属微滴受控喷射、打印成形、金属微滴融合、协调控制等突破性关键技术及多项基于均匀金属微滴的微小金属零件/非均质件成形的自主开发工艺。本书所阐述的基础理论和工艺技术问题在微小武器装备、微小复杂金属件、多材质件、智能器件等 3D 打印成形方面有重要的参考价值,在军事国防领域也具有广泛的应用前景。

本书是作者在国家“863”重点项目、国家自然科学基金、全国百篇优秀博士论文作者基金等多项课题资助下,对均匀金属微滴 3D 打印成形装备、均匀金属微滴喷射技术、微小复杂金属件打印理论与成形技术等方面潜心研究的理论与应用成果。该书以著者及其所指导研究生的学术成果为主要内容,并融入了国内外在均匀金属微滴 3D 打印成形技术方面的最新研究进展。著者所指导的博士生蒋小珊、

黄华、肖渊、晁艳普和硕士生徐林峰、李莉等在均匀微滴可控喷射装置及其控制系统开发方面做出了重要贡献,本专著的完成与著者所指导所有研究生的贡献是分不开的。西北工业大学机电学院、现代设计与集成制造教育部重点实验室为有关研究提供了良好的设施与条件。在此一并表示衷心感谢。

本书出版还得到了国防科技图书出版基金的资助,在此一并表示诚挚谢意!
由于著者水平有限,书中难免有不妥之处,敬请读者批评指正。

著者

2019年1月30日

目 录

| | |
|-------------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 | 1 |
| 1.1 均匀金属微滴喷射技术的分类及特点 | 1 |
| 1.1.1 连续均匀微滴喷射技术 | 1 |
| 1.1.2 微滴按需喷射技术 | 2 |
| 1.2 均匀金属微滴喷射技术发展概况与趋势 | 5 |
| 1.2.1 均匀金属微滴喷射技术发展概况 | 5 |
| 1.2.2 均匀金属微滴喷射 3D 打印技术的发展趋势 | 12 |
| 参考文献 | 13 |
| 第 2 章 均匀金属微滴喷射及沉积基础理论 | 16 |
| 2.1 均匀金属微滴连续喷射理论及微滴充电偏转机理 | 16 |
| 2.1.1 均匀金属微滴连续喷射理论(射流瑞利不稳定理论) | 16 |
| 2.1.2 均匀微滴的充电与偏转机理 | 19 |
| 2.2 金属微滴按需喷射技术 | 25 |
| 2.2.1 气压脉冲驱动式按需喷射理论 | 25 |
| 2.2.2 压电脉冲驱动式按需喷射理论 | 28 |
| 2.2.3 应力波驱动式按需喷射模型 | 29 |
| 2.3 均匀金属微滴飞行过程动力学及热力学理论 | 30 |
| 2.3.1 金属微滴飞行过程动力学过程 | 30 |
| 2.3.2 金属微滴飞行过程温度历程 | 31 |
| 2.4 均匀金属微滴沉积过程基础理论 | 33 |
| 2.4.1 金属微滴碰撞行为无量纲分析 | 33 |
| 2.4.2 金属熔滴非等温碰撞铺展行为 | 34 |
| 参考文献 | 39 |
| 第 3 章 均匀金属微滴可控喷射装置及设备 | 42 |
| 3.1 均匀微滴喷射用试验设备简介 | 42 |
| 3.2 连续均匀金属微滴喷射及充电偏转装置 | 44 |
| 3.2.1 连续均匀金属微滴喷射装置 | 44 |

| | | |
|------------|-----------------------------------|------------|
| 3.2.2 | 连续均匀金属微滴充电偏转装置 | 49 |
| 3.3 | 气压脉冲驱动式按需喷射系统的设计与实现 | 52 |
| 3.3.1 | 气压脉冲驱动式按需焊料微滴喷射装置 | 52 |
| 3.3.2 | 气压脉冲驱动式按需铝微滴喷射装置 | 53 |
| 3.4 | 径向压电脉冲金属微滴喷射装置 | 55 |
| 3.5 | 应力波驱动式按需喷射装置 | 57 |
| 3.6 | 金属微滴喷射沉积参数采集与控制系统 | 57 |
| 3.6.1 | 均匀金属微滴喷射沉积控制系统 | 57 |
| 3.6.2 | 均匀微滴喷射沉积关键参数采集系统 | 63 |
| | 参考文献 | 69 |
| 第4章 | 均匀金属微滴连续喷射及成形过程控制技术 | 71 |
| 4.1 | 连续均匀微滴喷射行为及其影响因素研究 | 71 |
| 4.1.1 | 连续均匀微滴喷射过程数值计算模拟及影响因素研究 | 71 |
| 4.1.2 | 试验参数对金属射流断裂过程的影响规律 | 82 |
| 4.2 | 均匀金属微滴充电和偏转控制 | 92 |
| 4.2.1 | 均匀金属微滴充电电量控制 | 92 |
| 4.2.2 | 充电均匀微滴流发散行为研究 | 95 |
| 4.2.3 | 均匀微滴充电偏转飞行实现与控制 | 99 |
| 4.2.4 | 均匀金属微滴偏转飞行过程温度变化 | 103 |
| 4.3 | 均匀金属微滴连续喷射成形及其控制 | 106 |
| 4.3.1 | 连续喷射成形影响因素与研究方法 | 106 |
| 4.3.2 | 均匀微滴连续喷射成形参数控制 | 107 |
| | 参考文献 | 111 |
| 第5章 | 金属微滴按需喷射与控制 | 112 |
| 5.1 | 气压脉冲驱动式按需喷射行为及其参数影响 | 112 |
| 5.1.1 | 铅锡合金微滴按需喷射研究 | 112 |
| 5.1.2 | 均匀铝微滴气压脉冲驱动式按需喷射研究 | 127 |
| 5.2 | 应力波驱动式按需喷射行为及其参数影响 | 134 |
| 5.2.1 | 试验装置参数对金属微滴喷射影响规律 | 134 |
| 5.2.2 | 应力波脉冲波形对金属微滴喷射的影响 | 135 |
| 5.3 | 各种金属微滴按需技术对比 | 138 |
| | 参考文献 | 139 |
| 第6章 | 均匀焊料微滴可控沉积及其3D打印成形控制 | 141 |
| 6.1 | 均匀焊料微滴沉积铺展行为及其最终形状影响因素 | 141 |

| | | |
|--------------|--------------------------------|------------|
| 6.1.1 | 均匀焊料微滴沉积铺展行为 | 141 |
| 6.1.2 | 试验参数对凝固微滴最终形貌影响因素 | 142 |
| 6.1.3 | 凸点高度误差修正方法及其精度分析 | 146 |
| 6.2 | 金属微滴可控打印轨迹规划及其影响因素 | 149 |
| 6.2.1 | 连续式打印参数对打印线条形貌的影响 | 150 |
| 6.2.2 | 选域择向沉积成形线条试验研究 | 158 |
| 6.2.3 | 均匀金属微滴打印微小零件沉积轨迹控制方法 | 166 |
| 6.3 | 微小金属零件微滴按需打印成形 | 172 |
| 6.3.1 | 微散热翅片成形 | 173 |
| 6.3.2 | 微小蜂窝件成形 | 175 |
| 6.3.3 | 微小方形件成形 | 176 |
| 6.3.4 | 微小齿轮件成形 | 178 |
| 6.3.5 | 微小支架件成形 | 179 |
| 6.4 | 电子封装用均匀铅锡合金微滴 3D 打印技术 | 180 |
| 6.4.1 | 球格阵列及焊柱阵列快速打印 | 180 |
| 6.4.2 | 电子线路快速打印及钎焊 | 183 |
| | 参考文献 | 185 |
| 第 7 章 | 均匀铝微滴喷射沉积成形与控制技术 | 186 |
| 7.1 | 均匀铝微滴沉积行为 | 186 |
| 7.1.1 | 铝微滴碰撞沉积行为 | 186 |
| 7.1.2 | 工艺参数对铝微滴轮廓形貌的影响 | 188 |
| 7.2 | 均匀铝微滴线条沉积 | 193 |
| 7.2.1 | 平台运动速度对线条沉积的影响 | 193 |
| 7.2.2 | 沉积基板温度对打印线条的影响 | 194 |
| 7.3 | 铝合金柱状件金属微滴按需打印 | 196 |
| 7.3.1 | 铝微滴沉积过程温度变化 | 196 |
| 7.3.2 | 沉积微滴柱形貌特征 | 199 |
| 7.3.3 | 铝微滴按需打印柱状件成形 | 200 |
| 7.4 | 铝合金薄壁件成形 | 208 |
| 7.5 | 铝合金实体件成形 | 209 |
| | 参考文献 | 211 |
| 第 8 章 | 均匀铝微滴沉积成形组织形貌演化过程 | 212 |
| 8.1 | 均匀铝微滴沉积微观组织形成规律研究 | 212 |
| 8.1.1 | 均匀铝微滴垂直堆叠组织形貌演化过程 | 215 |
| 8.1.2 | 均匀铝微滴沉积线条组织形貌演化过程 | 221 |

| | | |
|------------|----------------------------------|------------|
| 8.2 | 金属微滴熔合状态对铝合金打印件的影响 | 224 |
| 8.2.1 | 熔合状态对铝合金制件微观组织形貌的影响 | 224 |
| 8.2.2 | 熔合状态对铝合金打印件力学性能的影响 | 226 |
| 8.3 | 铝合金打印件内部缺陷形式及其影响因素 | 231 |
| 8.3.1 | 铝合金打印件内部孔洞缺陷 | 231 |
| 8.3.2 | 内部裂纹 | 234 |
| | 参考文献 | 239 |
| 第9章 | 基于均匀金属微滴喷射的3D打印应用前景 | 240 |
| 9.1 | 均匀等径球形金属颗粒制备 | 240 |
| 9.2 | 微电路打印与封装 | 241 |
| 9.3 | 微米级金属件打印 | 242 |
| 9.4 | 微小薄壁金属件打印 | 243 |
| 9.5 | 智能器件3D打印 | 244 |
| | 参考文献 | 245 |

Contents

| | |
|---|----|
| Chapter 1 Introduction | 1 |
| 1.1 Category and characteristics of uniform metal droplet ejection | 1 |
| 1.1.1 Continuous uniform droplet ejection | 1 |
| 1.1.2 Drop-on-demand ejection | 2 |
| 1.2 State-of-the-art and development trends of 3D printing based on uniform droplet ejection | 5 |
| 1.2.1 State-of-the-art of 3D printing based on uniform droplet ejection | 5 |
| 1.2.2 Development trends of 3D printing based on uniform droplet ejection | 12 |
| References | 13 |
| | |
| Chapter 2 Fundamental theory of uniform metal droplet ejection and deposition | 16 |
| 2.1 Mechanism of charging and deflection of droplets for continuous uniform droplet ejection | 16 |
| 2.1.1 Theory of the continuous uniform droplet ejection(instability theory of the Rayleigh jet) | 16 |
| 2.1.2 Mechanism of charging and deflection of uniform droplet stream | 19 |
| 2.2 Drop-on-demand ejection of uniform droplets | 25 |
| 2.2.1 Pneumatic pulse-driven drop-on-demand ejection | 25 |
| 2.2.2 Piezo pulse-driven drop-on-demand ejection | 28 |
| 2.2.3 Stress wave-driven drop-on-demand ejection | 29 |
| 2.3 Dynamics and thermal theories of droplets during flight | 30 |
| 2.3.1 Dynamics droplet behaviors during flight | 30 |
| 2.3.2 Thermal history of the uniform droplet during flight | 31 |
| 2.4 Fundamental theory for uniform droplets deposition | 33 |
| 2.4.1 Non-dimensional analysis of the metal droplet impact behaviors | 33 |

| | |
|---|----|
| 2. 4. 2 Non-isothermal droplets impact and spread behaviors | 34 |
| References | 39 |

| | |
|---|-----------|
| Chapter 3 Equipment for uniform droplet ejection | 42 |
| 3. 1 Equipment for ejection of continuous uniform droplet stream | 42 |
| 3. 2 Charging and deflection equipment for continuous uniform droplet stream | 44 |
| 3. 2. 1 Continuous uniform droplet stream generator | 44 |
| 3. 2. 2 Charging and deflection equipment for continuous uniform droplet stream | 49 |
| 3. 3 Design and implement of pneumatic pulse-driven drop-on-demand ejection system | 52 |
| 3. 3. 1 Pneumatic pulse-driven solder droplet ejection equipment | 52 |
| 3. 3. 2 Pneumatic pulse-driven aluminum droplet ejection equipment | 53 |
| 3. 4 Piezo pulse-driven metal droplet ejection equipment | 55 |
| 3. 5 Stress wave-driven metal droplet ejection equipment | 57 |
| 3. 6 Parametric acquisition and controlling system of metal droplet ejection and deposition | 57 |
| 3. 6. 1 Controlling system for uniform droplet ejection and deposition | 57 |
| 3. 6. 2 Key parametric acquisition system of droplet ejection and deposition | 63 |
| References | 69 |

| | |
|--|-----------|
| Chapter 4 Ejection of continuous uniform droplet stream and controlling technology of its forming process | 71 |
| 4. 1 Behaviors of uniform metal droplet spray and influence factors | 71 |
| 4. 1. 1 Numerical simulation of uniform droplet ejection process and influence elements | 71 |
| 4. 1. 2 Influence of experimental parameters on breakup of liquid metal jet | 82 |
| 4. 2 Controlling of uniform droplet stream charging and deflection | 92 |
| 4. 2. 1 Controlling of uniform metal droplet charging | 92 |
| 4. 2. 2 Dispersion behaviors of charged uniform metal droplet stream | 95 |
| 4. 2. 3 Charging and Deflection of uniform droplet stream and its controlling techniques | 99 |

| | | |
|------------|---|-----|
| 4. 2. 4 | Thermal history of uniform metal droplets during deflection | 103 |
| 4. 3 | Uniform metal droplet stream spray forming and its control techniques | 106 |
| 4. 3. 1 | Influence factors of uniform droplet stream spray forming | 106 |
| 4. 3. 2 | Parameter controlling of uniform droplet stream formation | 107 |
| References | | 111 |

Chapter 5 Drop-on-demand ejection of uniform metal droplet and its controlling techniques 112

| | | |
|------------|--|-----|
| 5. 1 | Pneumatic pulse driven metal droplet drop-on-demand ejection behaviors and factors influence | 112 |
| 5. 1. 1 | uniform solder droplet drop-on-demand ejection | 112 |
| 5. 1. 2 | uniform aluminum droplet drop-on-demand ejection | 127 |
| 5. 2 | Stress wave driven metal droplet drop-on-demand ejection behaviors and factors affect | 134 |
| 5. 2. 1 | Influence of equipment parameters on metal droplet ejection | 134 |
| 5. 2. 2 | Influence of stress wave shape on metal droplet ejection metal drop-on-demand techniques | 135 |
| 5. 3 | Comparison of different droplet ejection techniques | 138 |
| References | | 139 |

Chapter 6 Uniform solder droplet deposition and its 3D printing technology 141

| | | |
|---------|--|-----|
| 6. 1 | Spread behaviors of uniform solder droplets and influence factors of final droplet shape | 141 |
| 6. 1. 1 | Spread behaviors of uniform solder droplets | 141 |
| 6. 1. 2 | Influence of experimental parameters on final solid droplet shape | 142 |
| 6. 1. 3 | Correction method of solder bumps height and analysis of its accuracy | 146 |
| 6. 2 | Path planning of metal droplet printing and its influence factors | 149 |
| 6. 2. 1 | Influence of sequentially printing parameters on printed uniform metal trace morphology | 150 |
| 6. 2. 2 | Experimental research of alternate deposition of printed traces | 158 |
| 6. 2. 3 | Controlling of deposition trace for micro metal parts printing | |

| | |
|---|-----|
| by using uniform metal droplets | 166 |
| 6.3 Printing of micro metal parts by using uniform metal droplets | 172 |
| 6.3.1 Forming of micro heat sinks | 173 |
| 6.3.2 Forming of micro-honeycomb parts | 175 |
| 6.3.3 Forming of micro squared parts | 176 |
| 6.3.4 Forming of micro gears | 178 |
| 6.3.5 Forming of micro racks | 179 |
| 6.4 Uniform solder droplet 3D printing for electronic packaging | 180 |
| 6.4.1 Rapid printing of BGA and solder pillar array | 180 |
| 6.4.2 Rapid printing and soldering of the electronic circuits | 183 |
| References | 185 |

| | |
|--|------------|
| Chapter 7 Uniform aluminum droplet ejection and deposition and their controlling techniques | 186 |
| 7.1 Deposition behaviors of uniform aluminum droplets | 186 |
| 7.1.1 Aluminum droplets impact and spread behaviors | 186 |
| 7.1.2 Influence of process parameters on deposited aluminum droplet profile | 188 |
| 7.2 Deposition of uniform aluminum trace | 193 |
| 7.2.1 Influence of the platform velocity on uniform aluminum trace deposition | 193 |
| 7.2.2 Influence of the substrate temperature on printed uniform aluminum trace | 194 |
| 7.3 Drop-on-demand printing of aluminum pillar by uniform droplets | 196 |
| 7.3.1 Thermal change of deposited aluminum droplets | 196 |
| 7.3.2 Morphology features of deposited pillars | 199 |
| 7.3.3 Forming of pillars by drop-on-demand printing of aluminum droplets | 200 |
| 7.4 Freeform of thin wall aluminum parts | 208 |
| 7.5 Freeform of aluminum parts | 209 |
| References | 211 |

| | |
|---|------------|
| Chapter 8 Microstructure evolution of uniform aluminum droplets during 3D printing | 212 |
| 8.1 Microstructure evolution of uniform aluminum droplets | 212 |
| 8.1.1 Microstructure evolution of aluminum droplets during vertical pileup | 215 |
| 8.1.2 Microstructure evolution of aluminum traces deposited by | |