



“十三五”国家重点出版物
出版规划项目

中国制造2025



“中国制造2025”
出版工程

金属粉床 激光增材制造技术

魏青松 宋波 文世峰 周燕 等编著



化学工业出版社

“十三五”国家重点出版物
出版规划项目

国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION



“中国制造2025”
出版工程

金属粉床 激光增材制造技术

魏青松 宋波 文世峰 周燕 等编著



化学工业出版社

· 北京 ·

金属粉床激光增材制造技术是目前金属增材制造工艺中制件精度最高、综合性能优良的工艺方法。本书由华中科技大学快速制造中心总结其十余年的科研和产业化经验,综合国内外相关成果编写而成。全书共7章,第1章概述技术原理、特点及应用;第2~6章阐述工艺原理与系统组成、原材料特性要求、数据处理技术、制造流程及质量控制以及制件的组织及性能,涵盖原理、材料、数据、质量和性能五方面内容;第7章以实际案例阐述金属粉床激光增材制造技术在随形冷却模具、个性化医疗器件和轻量化构件三方面的应用,重点展示在复杂结构制造和特殊性能构建上的独特优势,达到举一反三、启迪创新的目的。

本书侧重基本原理,兼顾关键技术;以典型材料和工艺为主,兼顾最新动态;注重学术前沿,融合工程实践。本书既可作为科研和工程人员的参考用书,也可作为高等院校相关专业的教学教材。

图书在版编目(CIP)数据

金属粉床激光增材制造技术/魏青松等编著. —北京:化学工业出版社, 2019. 3

“中国制造 2025”出版工程

ISBN 978-7-122-33672-9

I. ①金… II. ①魏… III. ①激光技术-应用-金属粉末-机床 IV. ①TF124. 3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 005839 号

责任编辑:曾越 张兴辉

文字编辑:陈喆

责任校对:宋玮

装帧设计:尹琳琳

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印装:三河市延风印装有限公司

710mm×1000mm 1/16 印张17½ 字数326千字 2019年4月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888

售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 89.00 元

版权所有 违者必究

《“中国制造 2025” 出版工程》

编 委 会

主 任

孙优贤 (院士)

副主任 (按姓氏笔画排序)

王天然(院士) 杨华勇(院士) 吴澄(院士)

陈纯(院士) 陈杰(院士) 郑南宁(院士)

桂卫华(院士) 钱锋(院士) 管晓宏(院士)

委 员 (按姓氏笔画排序)

马正先 王大轶 王天然 王荣明 王耀南 田彦涛

巩水利 乔非 任春年 伊廷锋 刘敏 刘延俊

刘会聪 刘利军 孙长银 孙优贤 杜宇雷 巫英才

李莉 李慧 李少远 李亚江 李嘉宁 杨卫民

杨华勇 吴飞 吴澄 吴伟国 宋浩 张平

张晶 张从鹏 张玉茹 张永德 张进生 陈为

陈刚 陈纯 陈杰 陈万米 陈长军 陈华钧

陈兵旗 陈茂爱 陈继文 陈增强 罗映 罗学科

郑南宁 房立金 赵春晖 胡昌华 胡福文 姜金刚

费燕琼 贺威 桂卫华 柴毅 钱锋 徐继宁

郭彤颖 曹巨江 康锐 梁桥康 焦志伟 曾宪武

谢颖 谢胜利 蔡登 管晓宏 魏青松

序

制造业是国民经济的主体，是立国之本、兴国之器、强国之基。近十年来，我国制造业持续快速发展，综合实力不断增强，国际地位得到大幅提升，已成为世界制造业规模最大的国家。但我国仍处于工业化进程中，大而不强的问题突出，与先进国家相比还有较大差距。为解决制造业大而不强、自主创新能力弱、关键核心技术与高端装备对外依存度高等制约我国发展的问题，国务院于2015年5月8日发布了“中国制造2025”国家规划。随后，工信部发布了“中国制造2025”规划，提出了我国制造业“三步走”的强国发展战略及2025年的奋斗目标、指导方针和战略路线，制定了九大战略任务、十大重点发展领域。2016年8月19日，工信部、国家发展改革委、科技部、财政部四部委联合发布了“中国制造2025”制造业创新中心、工业强基、绿色制造、智能制造和高端装备创新五大工程实施指南。

为了响应党中央、国务院做出的建设制造强国的重大战略部署，各地政府、企业、科研部门都在进行积极的探索和部署。加快推动新一代信息技术与制造技术融合发展，推动我国制造模式从“中国制造”向“中国智造”转变，加快实现我国制造业由大变强，正成为我们新的历史使命。当前，信息革命进程持续快速演进，物联网、云计算、大数据、人工智能等技术广泛渗透于经济社会各个领域，信息经济繁荣程度成为国家实力的重要标志。增材制造（3D打印）、机器人与智能制造、控制和信息化技术、人工智能等领域技术不断取得重大突破，推动传统工业体系分化变革，并将重塑制造业国际分工格局。制造技术与互联网等信息技术融合发展，成为新一轮科技革命和产业变革的重大趋势和主要特征。在这种中国制造业大发展、大变革背景之下，化学工业出版社主动顺应技术和产业发展趋势，组织出版《“中国制造2025”出版工程》丛书可谓勇于引领、恰逢其时。

《“中国制造2025”出版工程》丛书是紧紧围绕国务院发布的实施制造强国战略的第一个十年的行动纲领——“中国制造2025”的一套高水平、原创性强的学术专著。丛书立足智能制造及装备、控制及信息技术两大领域，涵盖了物联网、大数

据、3D 打印、机器人、智能装备、工业网络安全、知识自动化、人工智能等一系列的核心技术。丛书的选题策划紧密结合“中国制造 2025”规划及 11 个配套实施指南、行动计划或专项规划，每个分册针对各个领域的一些核心技术组织内容，集中体现了国内制造业领域的技术发展成果，旨在加强先进技术的研发、推广和应用，为“中国制造 2025”行动纲领的落地生根提供了有针对性的方向引导和系统性的技术参考。

这套书集中体现以下几大特点：

首先，丛书内容都力求原创，以网络化、智能化技术为核心，汇集了许多前沿科技，反映了国内外最新的一些技术成果，尤其使国内的相关原创性科技成果得到了体现。这些图书中，包含了获得国家与省部级诸多科技奖励的许多新技术，因此，图书的出版对新技术的推广应用很有帮助！这些内容不仅为技术人员解决实际问题，也为研究提供新方向、拓展新思路。

其次，丛书各分册在介绍相应专业领域的新技术、新理论和新方法的同时，优先介绍有应用前景的新技术及其推广应用的范例，以促进优秀科研成果向产业的转化。

丛书由我国控制工程专家孙优贤院士牵头并担任编委会主任，吴澄、王天然、郑南宁等多位院士参与策划组织工作，众多长江学者、杰青、优青等中青年学者参与具体的编写工作，具有较高的学术水平与编写质量。

相信本套丛书的出版对推动“中国制造 2025”国家重要战略规划的实施具有积极的意义，可以有效促进我国智能制造技术的研发和创新，推动装备制造业的技术转型和升级，提高产品的设计能力和技术水平，从而多角度地提升中国制造业的核心竞争力。

中国工程院院士

潘圣铭

前言

增材制造（俗称 3D 打印）属于一种先进制造技术，但与传统制造工艺相比，它在成形原理、材料形态、制件性能上发生了根本性改变，对从事该技术教学、科研和工程应用的人员提出了全新挑战。特别是随着增材制造技术规模化和产业化发展与进步，传统的工艺流程、生产线、工厂模式和产业链组合都将面临深度调整，增材制造带来的影响远远超出了制造范畴，给生产甚至是生活带来了重大影响，被认为是有望深度影响未来的战略前沿技术。

金属粉床激光增材制造技术是目前金属增材制造工艺中制件精度最高、综合性优良的工艺方法。但是，技术发展并不成熟，新材料、新工艺和新装备不断涌现，技术进步快，缺少较新、全面和系统的专业书籍。华中科技大学快速制造中心是我国最早开展该技术研究的团队之一，在十多年科研和产业化基础上，综合国内外相关成果编著了本书。本书侧重基本原理，兼顾关键技术；以典型材料和工艺为主，兼顾最新动态；注重学术前沿，融合工程实践。本书既可作为科研和工程人员的参考用书，也可作为高等院校相关专业的教学教材。

全书分为 7 章。第 1 章概述技术原理、特点及应用；第 2~6 章阐述工艺原理与系统组成、原材料特性要求、数据处理技术、制造流程及质量控制以及制件的组织及性能，涵盖原理、材料、数据、质量和性能五方面内容；第 7 章以实际案例阐述增材制造技术在随形冷却模具、个性化医疗器件和轻量化构件三方面的应用，重点展示在复杂结构制造和特殊性能构建上的独特优势，达到举一反三、启迪创新的目的。

本书由华中科技大学魏青松组织编写。编写分工如下：第 1 章、第 2 章、第 5 章、第 7 章由华中科技大学魏青松和文世峰、中国地质大学（武汉）周燕编写；第 3 章、第 6 章由华中科技大学宋波编写；第 4 章由华中科技大学文世峰和蔡道生编写；华中科技大学史玉升主审了全书内容。博士后李伟，研究生韩昌骏、王倩、季宪

泰、严倩、王志伟、章媛洁、张金良、张磊、王敏参与了编写工作，博士后陈辉、朱文志、蔡超，研究生毛贻桅、杨益、李岩、田健等参与了资料整理。

由于笔者水平有限，书中难免有不足之处，恳请广大读者批评指正。

编著者

1 第1章 概述

- 1.1 金属增材制造技术 / 1
 - 1.1.1 激光选区熔化 (SLM) / 2
 - 1.1.2 激光近净成形 / 5
 - 1.1.3 电子束熔丝沉积 / 10
 - 1.1.4 电子束选区熔化 / 14
- 1.2 金属粉床激光选区熔化增材制造技术 / 16
 - 1.2.1 球化 / 17
 - 1.2.2 孔隙 / 19
 - 1.2.3 应力和裂纹 / 21
 - 1.2.4 成形材料 / 22
- 1.3 金属粉床激光选区熔化增材制造装备 / 24
- 1.4 金属粉床激光选区熔化增材制造技术应用及发展趋势 / 28
 - 1.4.1 SLM 技术的应用 / 28
 - 1.4.2 SLM 技术的发展趋势 / 34
- 参考文献 / 35

37 第2章 工艺原理与系统组成

- 2.1 工艺原理及实现 / 37
 - 2.1.1 工艺原理 / 37
 - 2.1.2 实现方式 / 38
 - 2.1.3 大台面多激光实现技术 / 40
- 2.2 关键功能部件 / 43
 - 2.2.1 光路系统 / 43
 - 2.2.2 缸体运动系统 / 47
 - 2.2.3 送铺粉机构 / 49
- 2.3 核心元器件 / 51

- 2.3.1 激光器 / 52
- 2.3.2 扫描系统 / 66
- 2.3.3 气体保护 / 72
- 2.3.4 氧传感器 / 73
- 2.3.5 循环净化装置 / 73
- 2.4 SLM 成形装备 / 74
 - 2.4.1 典型装备产品及特点 / 74
 - 2.4.2 华科三维 HKM 系列装备简介 / 77
- 参考文献 / 78

第 3 章 原材料特性要求

- 3.1 SLM 用金属粉末 / 79
- 3.2 金属粉末制备方法 / 81
 - 3.2.1 雾化法 / 82
 - 3.2.2 化学法 / 88
 - 3.2.3 机械法 / 93
- 3.3 粉末特性及其对制件的影响 / 94
 - 3.3.1 粉末性能参数 / 94
 - 3.3.2 粉末的形貌 / 100
 - 3.3.3 粉末的氧含量 / 102
 - 3.3.4 粉末中的杂质 / 104
- 参考文献 / 105

第 4 章 数据处理技术

- 4.1 STL 文件格式的介绍 / 107
 - 4.1.1 STL 的二进制格式文件 / 108
 - 4.1.2 STL 的文本格式文件 / 109
 - 4.1.3 STL 格式文件的特点 / 109
 - 4.1.4 STL 文件的一般读取算法 / 110
- 4.2 STL 模型预处理 / 113
 - 4.2.1 增材制造数据处理软件 / 113
 - 4.2.2 STL 文件纠错 / 118

- 4.2.3 STL 模型旋转与拼接 / 122
- 4.2.4 STL 模型工艺支撑添加 / 122
- 4.3 STL 模型切片及路径生成 / 126
 - 4.3.1 STL 模型切片 / 126
 - 4.3.2 STL 模型切片轮廓偏置 / 128
 - 4.3.3 扫描路径生成算法 / 129
- 参考文献 / 133

135

第 5 章 制造过程及质量控制

- 5.1 工艺流程 / 135
 - 5.1.1 前处理 / 135
 - 5.1.2 制造过程 / 138
 - 5.1.3 后处理 / 140
- 5.2 环境控制 / 141
 - 5.2.1 氧含量控制 / 141
 - 5.2.2 气氛烟尘净化 / 142
- 5.3 应力调控技术 / 143
 - 5.3.1 模拟预测 / 143
 - 5.3.2 预热技术 / 149
 - 5.3.3 激光扫描策略 / 150
- 参考文献 / 156

157

第 6 章 制件的组织及性能

- 6.1 制件的微观组织特征 / 157
 - 6.1.1 铁基合金组织 / 157
 - 6.1.2 钛基合金组织 / 165
 - 6.1.3 镍基合金组织 / 167
 - 6.1.4 铝基合金组织 / 181
 - 6.1.5 复合材料及其他组织 / 183
- 6.2 制件的性能及其调控方法 / 193
 - 6.2.1 制件性能及微观结构表征 / 193
 - 6.2.2 典型合金性能 / 205



6.2.3 性能的调控方法 / 213

参考文献 / 227

229 第7章 应用实例

7.1 随形冷却模具 / 229

7.1.1 随形冷却技术 / 229

7.1.2 随形冷却模具案例 / 233

7.2 个性化医疗器件 / 240

7.2.1 手术辅助器件 / 240

7.2.2 牙冠 / 244

7.2.3 关节及骨骼 / 246

7.3 轻量化构件 / 258

参考文献 / 262

264 索引

金属增材制造技术

增材制造技术是指根据三维数字模型，采取逐层叠加的方式直接加工出零件的一类技术，也称作三维（3D）打印、直接数字化制造、快速原型等，是20世纪80年代后期发展起来的一项新兴前沿技术，被认为是制造技术领域的一次重大突破。不少专家认为，增材制造具有数字化、网络化、个性化和定制化等特点，以其为代表的新制造技术将推动第三次工业革命^[1]。

直接制造金属零件及部件，甚至是组装好的功能性金属零件，无疑是制造业对增材制造技术提出的终极目标。早在20世纪90年代增材制造技术发展的初期（当时称为“快速原型制造技术”或“快速成形技术”），研究人员便已经尝试基于各种快速原型制造方法制备非金属原型，通过后续工艺实现了金属零件的制备^[2]。与立体光造型（Stereo Lithography, SLA）、叠层制造（Laminated Object Manufacturing, LOM）、熔融沉积成形（Fused Deposition Modeling, FDM）、三维打印（Three-Dimensional Printing, 3DP）等快速原型制造技术相比，激光选区烧结技术（Selective Laser Sintering, SLS）由于其使用粉末材料的特点，为制备金属零件提供了一种最直接的可能。SLS技术利用激光束扫描照射包覆有机胶黏剂的金属粉末，获得具有金属骨架的零件原型，通过高温烧结、金属浸润、热等静压等后续处理，烧蚀有机胶黏剂并填充其他液态金属材料，从而获得致密的金属零件。随着大功率激光器在快速成形技术中的逐步应用，SLS技术随之发展到激光选区熔化技术（Selective Laser Melting, SLM）。SLM技术利用高能量的激光束照射预先铺覆好的金属粉末材料，将其直接熔化并凝固、成形，获得金属制件。在SLM技术发展的同时，基于激光熔覆技术逐渐形成了金属增材制造技术研究的另一重要分支——激光快速成形技术（Laser Rapid Forming, LRF）或激光立体成形技术（Laser Solid Forming, LSF），国内习惯称这类成形技术为激光近净成形技术（Laser Engineering Net Shaping, LENS）。该技术起源于美国Sandia国家实验室的LENS技术，利用高能量激光束将与光束同轴喷射或侧向喷射的金属粉末直接熔化为液态，通

过运动控制将熔化后的液态金属按照预定的轨迹堆积凝固成形，获得尺寸和形状非常接近于最终零件的“近形”制件，经过后续的小余量加工以及必要的后处理获得最终的金属制件。SLM技术和LENS技术作为金属增材制造技术的两个主要研究热点，引领着当前金属增材制造技术的发展。由于具有极高的制造效率、材料利用率以及良好的成形性能等优势，金属增材制造技术从一开始便被应用于高性能和稀有金属材料零部件的制造。经过20余年的发展，国内金属增材制造技术在材料、工艺、装备以及成形性能等各个方面均取得了长足的发展，在结构复杂、材料昂贵的产品，以及小批量定制生产方面，成本、效率和质量优势突出，并且已经在航空航天等高端制造领域实现了初步应用。

除了上述两种金属增材制造方式，还有另外两种金属增材制造方式也得到了广泛的关注：电子束选区熔化技术（Electron Beam Selective Melting, EBSM）和电子束熔丝沉积技术（Electron Beam Free Form Fabrication, EBF³）。其中SLM和EBSM的材料填充方式均基于粉床，制造复杂精密结构件具有优势，但目前该类技术存在产品尺寸小（一般小于300mm），加工效率低，对金属粉末性能要求高，生产成本高昂等问题。LENS和EBF³技术的材料填充方式分别基于送粉和送丝，更适合于中大型零件的快速制造^[3]。

1.1.1 激光选区熔化（SLM）

激光选区熔化技术是集计算机辅助设计、数控技术、增材制造于一体的先进制造技术。采用SLM技术可直接制造精密复杂的金属零件，是增材制造技术的主要发展方向之一。激光选区熔化技术利用直径30~50 μm 的聚焦激光束，把金属或合金粉末逐层选区熔化，堆积成一个冶金结合、组织致密的实体。采用激光选区熔化技术，可以实现精密零件及个性化、定制化器件的制造。该技术不像传统的金属零件制造方法那样，需要制作木模、塑料模和陶瓷模等，可以直接制造金属零件，大大缩短了产品开发周期，减少了开发成本。SLM技术的发展给制造业带来了无限活力，尤其是给快速加工、快速模具制造、个性化医学产品、航空航天零部件和汽车零配件生产行业的发展注入了新的动力^[4]。

（1）工艺原理

激光选区熔化工艺过程如图1-1所示。首先将三维CAD模型切片离散并规划扫描路径，得到可控制激光束扫描的路径信息。其次计算机逐层调入路径信息，通过扫描振镜控制激光束选择性地熔化金属粉末，未被激光照射区域的粉末仍呈松散状。加工完一层后，粉缸上升，成形缸降低切片层厚的高度，铺粉辊将粉末从粉缸刮到成形平台上，激光将新铺的粉末熔化，与上一层熔为一体。重复上述过程，直至成形过程完成，得到与三维实体模型相同的金属零件^[5]。

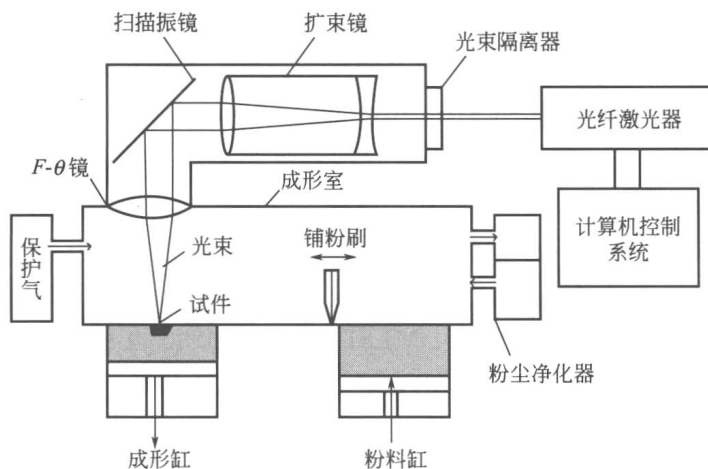


图 1-1 典型的双缸 SLM 工艺过程

(2) 材料与精度

激光选区熔化能够直接由三维实体模型制成最终的金属零件，对于复杂金属零件，无须制作模具。使用材料目前主要包括钴合金、镍合金、钢、铝合金和生物医用合金。粉末主要是气雾化球形粉，粒径 $10\sim 50\mu\text{m}$ 。该工艺加工层厚 $20\sim 50\mu\text{m}$ ，激光光束小，微熔池特征尺寸在 $100\mu\text{m}$ 左右，所以精度一般为 $0.05\sim 0.1\text{mm}$ ，表面粗糙度 $10\sim 20\mu\text{m}$ ，可以满足大部分无需装配的金属零件快速制造，也是目前精度最高的金属增材制造工艺。

(3) 应用领域

SLM 工艺适合加工形状复杂的零件，尤其是具有复杂内腔结构和具有个性化需求的零件，适合单件或者小批量生产。目前国外 EOS 公司、SLM Solutions 公司、Concept Laser 公司和 MCP 公司已经将 SLM 工艺应用到航空航天、汽车、家电、模具、工业设计、珠宝首饰、医学生物等方面，国内华中科技大学、华南理工大学等单位在生物医学、工业模具和个性化零部件等方面开展了应用研究^[6]。

(4) 成形装备

激光选区熔化成形设备主要由激光器、光路传输单元、密封成形室（包括铺粉装置）、机械单元、控制系统、工艺软件等几个部分组成。激光器是 SLM 成形设备的核心部件，直接决定了 SLM 零部件的质量。目前国内外的 SLM 成形设备主要采用光纤激光器，其光束质量 $M^2 < 1.1$ ，光束直径内能量呈现高斯分布，具有效率高、使用寿命长、维护成本低等特点，是 SLM 技术的最好选择。

在 SLM 装备生产方面，主要集中在德国、英国、日本、法国等国家。其中，德国是从事 SLM 技术研究最早与最深入的国家。第一台 SLM 设备是 1999 年德国 Fockele 和 Schwarze (F&S) 研发的，这是与德国弗朗霍夫研究所一起研发的基于不锈钢粉末的 SLM 成形设备。2004 年，F&S 与原 MCP (现为 MTT 公司) 一起发布了第一台商业化激光选区熔化设备 MCP Realizer 250，后来升级为 SLM Realizer250；2005 年，高精度 SLM Realizer100 研发成功。自从 MCP 发布了 SLM Realizer 设备后，其他设备制造商 (Trumpf, EOS 和 Concept Laser) 也以不同名称发布了他们的设备，如直接金属烧结 (DMLS) 和激光熔融 (LC)。其中 EOS 发布的 DMLSEOSINT M290 也是目前金属成形最常见的机型。图 1-2 给出了目前国际上主要的 SLM 成形装备。

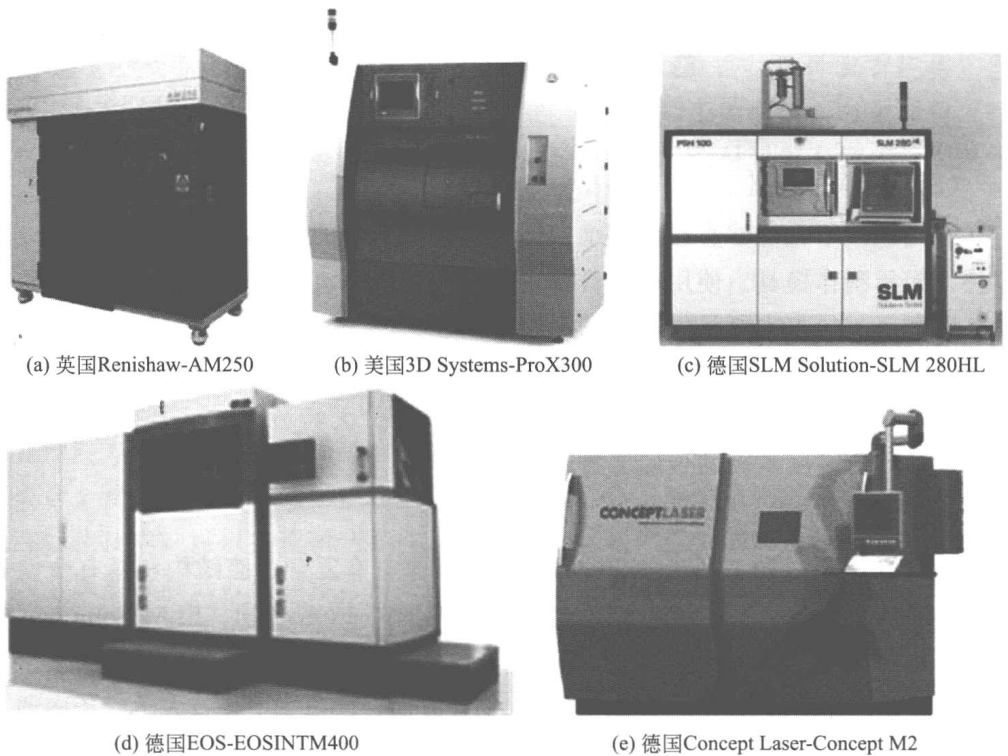


图 1-2 国际上主要 SLM 装备

在我国，华中科技大学快速制造中心于 2003 年推出了采用半导体泵浦 150W YAG 激光器和采用 100W 光纤激光器的 SLM 设备，拉开了我国对 SLM 研究的序幕。2007 年，华南理工大学在 DiMteal-240 基础上，开发出第二代 SLM 设备 DiMteal-280，该设备采用的激光器为 Yb 光纤激光器，光斑直径 50~200 μm ，典型扫描

速度 200~600mm/s, 制品尺寸精度 20~100 μ m。北京航空制造工程研究所开发出大台面 SLM 设备样机 LSF-M360, 成形范围达 350mm \times 350mm \times 400mm。目前, 国内 SLM 设备研究取得了一定进展, 但是国内 SLM 设备的关键部件, 如激光器、聚焦镜、高速扫描振镜等仍以进口为主。

(5) 关键技术

SLM 工艺主要包括激光光路优化以及成形零部件致密度、表面质量、尺寸精度、残余应力、强度和硬度的控制。研究表明, SLM 工艺的影响因素有上百个, 其中有 10 多个因素具有决定作用。工艺参数组合的选择能够决定成形质量的好坏, 甚至成形过程的成败。

1.1.2 激光近净成形

激光近净成形技术 (Laser Engineering Net Shaping, LENS) 是将信息化增材成形原理与激光熔覆技术相结合, 通过激光熔化/快速凝固逐层沉积“生长/增材制造”, 由零件 CAD 模型一步完成全致密、高性能整体金属结构件的“近净成形”^[7]。目前国际上提及的激光立体成形 (Laser Solid Forming, LSF)、激光熔化沉积 (Laser Melted Deposition, LMD)、激光快速成形 (Laser Rapid Forming, LRF)、激光增材制造 (Laser Additive Manufacturing, LAM)、光控制造 (Direct Light Fabrication, DLF) 和激光固化 (Laser Consolidation, LC) 等均属于这类工艺的范畴。

(1) 工艺原理

激光近净成形技术的基本过程如图 1-3 所示。首先在计算机中生成零件的三维 CAD 实体模型, 然后将模型按一定的厚度切片分层, 即将零件的三维形状信息转换成一系列二维轮廓信息, 随后在数控系统的控制下, 用同步送粉激光熔覆的方法将金属粉末材料按照一定的填充路径在一定的基材上逐点熔化, 重复这一过程逐层堆积形成三维实体零件。原则上也可以采用同步送丝激光熔覆的方法来成形零件^[8]。

(2) 材料及精度

激光近净成形技术以成形可直接使用的能够承载力学载荷的金属零件为目标, 不仅关注其三维成形特性, 同时也注重成形件的力学性能。这项技术成形材料广泛, 目前主要包括钛合金、高温合金、钢和难熔合金等, 从理论上讲, 任何能够吸收激光能量的粉末材料都可以用于激光近净成形工艺。同时, 同步送粉/丝的材料送进特点, 使得激光近净成形技术还能够制造具有结构梯度和功能梯度的复合材料。目前这项技术一般还需要进行少量的后续机械加工才能最终完成零件的制造, 其精度较 SLM 工艺低。