



激光弯曲成形及 功能梯度材料成形技术

尚晓峰 苏荣华 王志坚 著



冶金工业出版社
Metallurgical Industry Press

TB34
56

014005590

激光弯曲成形及 功能梯度材料成形技术

尚晓峰 苏荣华 王志坚 著



TB34
56

北京
冶金工业出版社
2013



北航

C1693439

014002280

内 容 简 介

本书系统地介绍了激光制造技术,包括激光制造技术的发展、应用及分类。书中分别从实验研究、理论研究、数值模拟研究三个方面介绍了激光金属弯曲成形的机理。本书对功能梯度材料激光快速成形系统,及在钛合金表面制备出钛基耐磨功能梯度材料进行了介绍。

本书适合于高等学校、科研院所、企业中从事激光制造技术研究以及应用的技术人员参考与使用。

图书在版编目(CIP)数据

激光弯曲成形及功能梯度材料成形技术/尚晓峰,
苏荣华,王志坚著. —北京:冶金工业出版社, 2013. 11
ISBN 978-7-5024-6383-0

I. ①激… II. ①尚… ②苏… ③王… III. ①激光
技术—应用—功能材料—弯曲成型 IV. ①TB34

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 263281 号

出版人 谭学余

地 址 北京北河沿大街嵩祝院北巷 39 号, 邮编 100009

电 话 (010)64027926 电子信箱 yjchs@cnmip.com.cn

责任编辑 李 臻 美术编辑 杨 帆 版式设计 杨 帆

责任校对 禹 蕊 责任印制 张祺鑫

ISBN 978-7-5024-6383-0

冶金工业出版社出版发行; 各地新华书店经销; 三河市双峰印刷装订有限公司印刷

2013 年 11 月第 1 版, 2013 年 11 月第 1 次印刷

148mm×210mm; 7.75 印张; 228 千字; 236 页

25.00 元

冶金工业出版社投稿电话: (010)64027932 投稿邮箱: tougao@cnmip.com.cn

冶金工业出版社发行部 电话: (010)64044283 传真: (010)64027893

冶金书店 地址: 北京东四西大街 46 号(100010) 电话: (010)65289081(兼传真)

(本书如有印装质量问题, 本社发行部负责退换)

前 言

快速原型 (RP) 技术自 20 世纪 80 年代末兴起以来取得长足的发展和进步。近两年来, 风靡全球的三维打印 (3DP) 技术将快速原型技术的研究和应用推向新的高潮。高功率激光快速成形技术作为快速原型技术的重要分支, 一直是科技工作者研究和应用的热点。

本书根据辽宁工程技术大学苏荣华教授和沈阳航空航天大学尚晓峰、王志坚副教授多年研究成果汇集编著而成。书中系统论述了激光制造技术的发展历史、工艺分类及实践应用。从实验分析、理论推导及数值模拟三方面进行了激光金属弯曲快速成形机理研究。考虑到现实工程背景中存在不可避免的随机因素, 将随机模型引入, 考虑激光加工过程中几何参数、材料参数、工艺参数的随机变异性, 采用 Monte - Carlo 方法, 定义相对均差系数、变异系数两个无量纲量, 对已有的有影响力的激光弯曲成形弯曲角计算公式给出了变异性分析结果。对两次激光弯曲成形扫描过程中预热温度对温度场、位移场的影响规律进行了分析, 发现随着预热温度的升高, 金属板自由端节点 Z 方向位移逐渐增大; 同单次激光弯曲成形扫描相比, 由于预热温度的提高, 第二次扫描获得的位移增量小于单次扫描获得的位移增量。研究了采用激光快速成形技术制备功能梯度材料的设备、软件、工艺和材料分析等技术, 构建功能梯度材料激光快速成形系统; 完善功能梯度材料激光快速成形软件; 对成形过程进行温度场仿真计算并且对结果进行分析; 在钛合金表面制备原位自生 TiC 颗粒增强的钛基耐

磨功能梯度材料。观察了钛合金功能梯度材料的宏、微观组织并采用摩擦磨损试验机测试钛合金功能梯度材料的摩擦系数及耐磨性能。

全书包括三个部分，共 10 章。第一部分介绍激光制造技术，主要包括：激光制造技术概述、激光弯曲成形技术、功能梯度材料的激光快速成形；第二部分研究金属激光弯曲成形机理，主要包括：金属激光弯曲成形实验、金属激光弯曲成形过程随机变异性分析、金属激光弯曲成形过程有限元模拟；第三部分研究功能梯度材料激光快速成形，主要包括：功能梯度材料激光快速成形系统、功能梯度材料激光快速成形系统软件、功能梯度材料激光快速成形工艺方法、功能梯度材料激光快速成形零件性能分析。

本书由尚晓峰、苏荣华、王志坚编著，具体分工是王志坚编著第 1、9 章，苏荣华编著第 2、4~6 章，尚晓峰编著第 3、7、8、10 章。沈阳航空航天大学硕士研究生赵青贺、邓卫东参加了参考文献的收集整理、插图绘制以及文字录入工作。全书由苏荣华教授审稿、定稿。

本书由国家自然科学基金资助项目“基于 CA-LB 多场耦合的钛合金激光快速成形熔池凝固枝晶生长机理研究”支持。适合于高等学校、科研院所、企业中从事激光制造技术研究以及应用的人员参与与使用。

由于我们水平有限，编写时间仓促，书中难免有不妥之处，恳请广大读者批评指正。

编 者

2013 年 7 月

目 录

| | |
|-------------------------|----|
| 第一部分 激光制造技术 | |
| 1 激光制造技术概述 | 1 |
| 1.1 激光制造技术的概念 | 1 |
| 1.2 激光制造技术的发展及应用 | 1 |
| 1.2.1 激光制造系统的发展 | 1 |
| 1.2.2 激光制造技术的应用 | 3 |
| 1.3 激光制造技术的分类 | 4 |
| 1.3.1 激光快速成形技术 | 4 |
| 1.3.2 激光焊接技术 | 9 |
| 1.3.3 激光表面工程技术 | 14 |
| 2 激光弯曲成形技术 | 21 |
| 2.1 激光弯曲成形的特点 | 21 |
| 2.2 激光弯曲成形的基本原理 | 22 |
| 2.2.1 温度梯度机理 | 22 |
| 2.2.2 屈曲机理 | 23 |
| 2.2.3 增厚机理 | 23 |
| 2.2.4 弹性膨胀机理 | 24 |
| 2.2.5 耦合理论 | 25 |

| | |
|------------------------------------|-----------|
| 2.3 激光弯曲成形技术研究现状 | 25 |
| 2.3.1 国外研究现状 | 25 |
| 2.3.2 国内研究现状 | 28 |
| 3 功能梯度材料的激光快速成形 | 31 |
| 3.1 功能梯度材料综述 | 31 |
| 3.2 功能梯度材料激光快速成形技术国内外研究现状 | 34 |
| 3.2.1 国外研究现状 | 34 |
| 3.2.2 国内研究现状 | 35 |
| 第二部分 金属激光弯曲成形机理 | |
| 4 金属激光弯曲成形实验 | 37 |
| 4.1 实验条件与参数选择 | 37 |
| 4.1.1 实验条件 | 37 |
| 4.1.2 实验参数的选择 | 38 |
| 4.2 单因素试验结果分析 | 51 |
| 4.2.1 激光扫描速度对弯曲角的影响 | 51 |
| 4.2.2 激光功率对弯曲角的影响 | 53 |
| 4.2.3 光斑直径对弯曲角的影响 | 56 |
| 4.2.4 板厚对弯曲角的影响 | 58 |
| 4.3 双因素试验结果分析 | 59 |
| 4.4 正交试验结果分析 | 60 |
| 4.5 金相组织结构对板材激光弯曲成形的影响 | 64 |
| 4.5.1 温度测量与分析 | 64 |
| 4.5.2 扫描区截面尺寸测量与分析 | 67 |

| | | |
|----------|--------------------------------|-----------|
| 4.5.3 | 扫描区截面金相组织分析 | 71 |
| 4.5.4 | 金相组织变化对激光热成形影响情况分析 | 73 |
| 5 | 金属激光弯曲成形过程随机变异性分析 | 75 |
| 5.1 | 激光弯曲成形角度计算模型 | 75 |
| 5.2 | 激光弯曲成形过程随机因素分析 | 78 |
| 5.3 | 激光成形角度的解析模型计算精度比较 | 82 |
| 5.4 | 弯曲角解析计算公式变异性分析 | 83 |
| 5.4.1 | 相对均差系数和变异系数 | 83 |
| 5.4.2 | 材料 st12 弯曲角计算变异性分析 | 84 |
| 5.4.3 | 材料 X12CrNi188 弯曲角计算变异性分析 | 90 |
| 6 | 金属激光弯曲成形过程有限元模拟 | 97 |
| 6.1 | 热弹塑性基本理论 | 97 |
| 6.1.1 | 热弹塑性问题分析假定 | 97 |
| 6.1.2 | 温度场分析的基本原理 | 97 |
| 6.1.3 | 应力应变场分析模型 | 99 |
| 6.2 | 金属激光弯曲成形温度场分析 | 103 |
| 6.2.1 | 单次扫描激光弯曲成形温度场分析 | 103 |
| 6.2.2 | 同路径两次扫描激光弯曲成形温度场分析 | 108 |
| 6.2.3 | 不同路径两次扫描激光弯曲成形温度场分析 | 113 |
| 6.3 | 金属激光弯曲成形位移场分析 | 118 |
| 6.3.1 | 单次扫描激光弯曲成形位移场分析 | 118 |
| 6.3.2 | 同路径两次扫描激光弯曲成形位移场分析 | 123 |
| 6.3.3 | 不同路径两次扫描激光弯曲成形位移场分析 | 126 |
| 6.4 | 金属激光弯曲成形应力场分析 | 129 |
| 6.4.1 | 单次扫描激光弯曲成形应力场分析 | 129 |

- 6.4.2 同路径两次扫描激光弯曲成形应力场分析 136
- 6.4.3 不同路径两次扫描激光弯曲成形应力场分析 140

第三部分 功能梯度材料激光快速成形

- 7 功能梯度材料激光快速成形系统 145
- 7.1 金属粉末激光成形系统 145
- 7.1.1 金属粉末激光成形系统简介 145
- 7.1.2 金属粉末激光成形系统激光光斑形状测试 147
- 7.2 三料仓实时变比例同轴送粉器 157
- 7.2.1 三料仓送粉器 158
- 7.2.2 同轴粉末喷嘴 162
- 7.3 真空箱 183
- 7.3.1 真空室结构设计 184
- 7.3.2 真空获得系统设备选择 185
- 8 功能梯度材料激光快速成形系统软件 187
- 8.1 分层切片扫描填充模块 187
- 8.2 材料组分分布设计模块 189
- 8.2.1 功能梯度材料组分分布表示方法 189
- 8.2.2 功能梯度材料组分分布设计方法 190
- 8.2.3 功能梯度材料信息表达接口文件 192
- 9 功能梯度材料激光快速成形工艺方法 195
- 9.1 金属功能梯度薄壁零件三维瞬态温度场数值模拟 195
- 9.1.1 有限元模型建立及求解 195

| | |
|------------------------------------|------------|
| 9.1.2 求解结果后处理 | 199 |
| 9.2 激光快速成形技术制备金属功能零件倾斜极限 | 211 |
| 9.2.1 倾斜极限及层间搭接率 | 212 |
| 9.2.2 试验方法及其条件 | 213 |
| 9.2.3 试验结果与分析 | 214 |
| 9.2.4 验证试验 | 216 |
| 10 功能梯度材料激光快速成形零件性能分析 | 218 |
| 10.1 功能梯度材料显微组织分析 | 218 |
| 10.2 熔覆层的耐磨性能 | 224 |
| 参考文献 | 226 |

第一部分 激光制造技术

1 激光制造技术概述

1.1 激光制造技术的概念

激光制造是以激光光子作为能量的载体，通过光子与材料的相互作用，引起材料一系列的物理和化学变化，从而实现材料的制备、切割、打孔、刻槽、标记等应用工艺。

激光制造技术包含两方面的内容：一是制造激光光源的技术；二是利用激光作为工具的制造技术。前者为制造业提供性能优良、稳定可靠的激光器以及加工系统；后者利用前者进行各种加工和制造，为激光系统的不断发展提供广阔的应用空间。两者是激光制造技术中不可或缺的环节，不可偏废。激光制造技术具有许多传统制造技术所没有的优势，例如，材料浪费少，在大规模生产中制造成本低；根据生产流程进行编程控制，在大规模制造中生产效率高；可接近或达到“冷”加工状态，实现常规技术不能执行的高精密制造；对加工对象的适应性强，且不受电磁干扰，对制造工具和生产环境的要求低；噪声低，不产生任何有害的射线与残剩，生产过程对环境的污染小等，是一种符合可持续发展战略的绿色制造技术。

1.2 激光制造技术的发展及应用

1.2.1 激光制造系统的发展

用于制造业中的激光系统即激光制造系统一般由激光器、激光传输系统、激光聚焦系统、控制系统、运动系统、传感与检测系统

组成,其核心为激光器。

激光作为热源或光源(能量)是激光制造中的“刀具”或“工具”。该“刀具”或“工具”的质量直接影响着加工制造的结果。激光光束质量的好坏可以用光束远场发散角、光束聚焦特征参数值 K_f 和衍射极限倍因子 M_2 (M) 或光束传输因子 K 值来表征。对于小功率激光器,工作物质均匀稳定,一般可以实现基模输出,其光束横截面能量分布为高斯分布,且在传输过程中保持不变,光束质量较好;对于大功率激光器,一般不易得到基模输出,输出的往往为多模激光束,质量变差。目前工业上常用的大功率激光器有 CO_2 激光器和 YAG 激光器两种。大功率激光器的工业应用领域很广,激光切割、激光焊接都需要优良的光束质量,而追求高光束质量的大功率激光是工业用激光器不断发展的目标。

从 1964 年第一台 CO_2 激光器出现到现在,经过近五十年的发展,从封离式 CO_2 激光器、慢速轴流 CO_2 激光器、横流 CO_2 激光器,到高频罗兹泵型快速轴流 CO_2 激光器、射频 turbo 型快速轴流 CO_2 激光器以至目前出现的扩散型 Slab CO_2 激光器的发展中可以看到,一方面激光输出功率不断提高,体积不断缩小;另一方面激光器的效率不断提高,光束质量越来越好。扩散型 Slab CO_2 激光器光束横截面上的光强分布接近高斯分布,具有极好的光束质量,在加大的激光加工工作区焦点的漂移很小,非常有利于大范围激光传输与聚集,这对大尺寸工件的切割应用非常重要。

工业用固体 YAG 激光器也经历了从小功率灯泵浦(棒状)、灯泵浦(板条)、双灯泵浦(多棒)到光纤泵浦(棒状)、半导体泵浦(棒状)和固体激光器(片状)的过程。由于受工作物质热物理性质的制约,YAG 激光光束质量模式相对较差。如何提高光束质量和激光功率,仍是 YAG 激光器面临的主要问题。

值得注意的是近年来发展起来的半导体激光器。半导体激光器具有小型化、频率极高、与光纤耦合良好、易于调制等优良特性,因而具有广阔的应用前景。

要在不同产业中广泛应用激光制造技术,很大程度上依赖于激光加工系统的性能与工艺。欧、美、日一些国家在新光源、加工系

统及工艺等方面的研究与开发就从未降温过。随着激光工作物质的研究与开发、器件与单元技术的改进和创新,以高性能、宽波段、大功率为特征的激光取得了蓬勃的发展,如紫外光输出的 KrF 与 ArF 准分子激光器、倍频激光器等。尤其是高功率光纤激光的出现使激光制造的移动式定位加工变得更加便利。

1.2.2 激光制造技术的应用

与传统制造技术相比,激光制造技术突出的优势主要体现在以下几个方面:

(1) 特种材料特殊要求的加工。激光焊接与大多数传统的焊接方法相比具有突出的优点。激光能量的高度集中和加热、冷却过程极其迅速可破坏一些难熔金属表面的应力阈值,或使高热导率和高熔点金属快速熔化,完成某些特种金属或合金材料的焊接,而且在激光焊接过程中无机械接触,容易保证焊接部位不因热压缩而变形,还排除了无关物质落入焊接部位的可能;如果采用大焦深的激光系统,还可实现特殊场合下的焊接,比如,由软件控制的需隔离的远距离在线焊接、高精密防污染的真空环境焊接等;在不发生材料表面蒸发的情况下可熔化最多数量的物质,达到高质量的焊接。以上特点是传统焊接工具与方法很难或完全不能做到的。目前在汽车、国防、航空航天等一些特殊行业已普遍采用激光焊接技术。例如欧洲一些国家在高档汽车车壳与底座、飞机机翼、航天器机身等一些特种材料的焊接中,激光的应用已基本取代了传统的焊接工具和方法。

(2) 特殊精度的加工制造。这里指的特殊精度除通常意义下的精确定位外,主要还体现在材料内部热传导效应量级的控制上。激光的显著特点之一就是可采取连续和脉冲方式输出。以固体的钻孔与切割为例,激光能量高度集中,以及加热、冷却速度快的特点可实现传统技术达到的普遍要求,加工属热化学过程。突出的是,通过脉冲式激光辐射可达到接近“冷”加工的光化学动力过程。一方面选择脉冲的时间宽度,使得材料内的热传导过程和热化学反应来不及发生;另一方面通过控制激光的功率密度和脉冲计数,按要求

达到确定的去除深度,从而实现高精度的“线”切割和“点”钻孔加工。欧美一些国家在许多有特殊要求的领域和产业中已普遍采用这种脉冲激光制造技术。

(3) 微细加工制造。激光微细加工技术最成功的应用是在 20 世纪后半叶发展起来的微电子学领域。激光微细加工作为微电子集成电路中的单元微加工技术之一,现已形成固定模式并投入规模化生产中。除此之外,能突显其优势的领域还有精密光学仪器的制造、高密度信息的写入存储、生物细胞组织的医疗等。选择适当波长的激光,通过各种优化工艺和逼近衍射极限的聚焦系统,可获得高质量光束、高稳定性微小尺寸焦斑的输出。利用其锋芒尖利的“光刀”特性,可进行高密微痕的刻制、高密信息的直写;也可利用其光阱的“力”效应,进行微小透明球状物的夹持操作。例如高精密光栅的刻制(精密光刻);通过 CAD/CAM 软件进行仿真图案或文字的控制,实现高保真打标;利用光阱的“束缚力”,对生物细胞执行移动操作(生物光镊);高密度信息的激光记录和微细机械零部件的光制造。

1.3 激光制造技术的分类

激光制造技术主要包括:激光快速成形技术、激光焊接技术、激光表面工程技术和激光弯曲成形技术。本小节主要介绍前三种分类,激光弯曲成形技术将在本部分的第 2 章着重介绍。

1.3.1 激光快速成形技术

1.3.1.1 激光快速成形技术的基本原理

激光快速成形技术的基本原理是先由 CAD 软件产生零件实体模型;然后用分层软件对 CAD 实体模型按照一定的厚度进行离散分层切片处理,获取各截面的几何信息;接着根据切片轮廓设计出扫描轨迹,并将其转化成 NC 工作台的运动指令。成形时将具有一定功率密度的激光束照射到基材表面形成熔池,同时金属粉末由送粉器送出,经送粉管路输送到同轴送粉头并进入熔池形成熔覆层,根据 CAD 给定的各层截面路径规划,在 NC 的控制下使送粉头相对于工

作台运动,将金属材料逐层扫描堆积,最后制造出金属实体零件。为防止某些金属在成形的过程中氧化,以上过程可在一个气氛可控的保护箱中进行或采用其他手段来进行保护,使激光成形过程中的金属不被氧化。激光快速成形的原理如图 1-1 所示,利用了“离散/堆积”的制造思想,将“材料设计、制备”与“近净成形”有机融为一体,是集数字化、柔性化以及高效低成本为一体的先进制造技术。

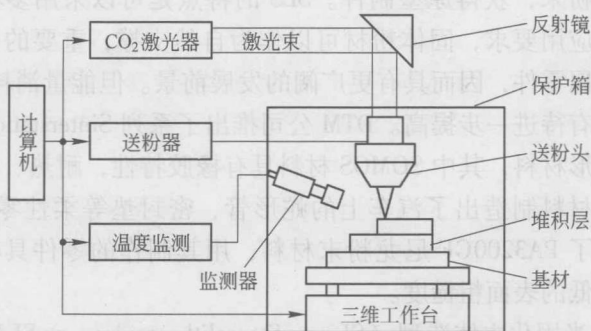


图 1-1 激光快速成形原理

1.3.1.2 激光快速成形技术的特点

由于快速成形技术(包含激光快速成形技术)仅仅在需要增加材料的地方增加材料,所以从设计到自动化,从知识获取到计算机处理,从计划到接口、通讯等方面来看,非常适合于 CIM、CAD 及 CAM,因此与传统的制造方法相比,激光快速成形显示出诸多的优点:

(1) 制造速度快、成本低,为传统制造方法注入新的活力,而且可实现自由制造(Free Form Fabrication),产品制造过程以及产品造价几乎与产品的批量和复杂性无关。

(2) 采用非接触加工的方式,没有传统加工的残余应力问题,没有工具更换和磨损之类的问题,无切割、噪声和振动等,有利于环保。

(3) 可实现快速铸造、快速模具制造,特别适合于新产品开发

和单件零件生产。

1.3.1.3 激光快速成形技术的工艺方法

激光快速成形技术的工艺方法包括:

(1) 选择性激光烧结 (SLS—Selected Laser Sintering)。SLS 技术是根据 CAD 生成的三维实体模型, 通过分层软件分层, 获得二维数据驱动控制激光束, 有选择性地对铺好的各种粉末材料进行烧结, 加工出要求形状的薄层, 逐层累积形成实体模型, 最后去掉未烧结的松散的粉末, 获得原型制件。SLS 的特点是可以采用多种材料适应不同的应用要求, 固体粉材可以作为自然支撑, 重要的是可以直接制造金属零件, 因而具有更广阔的发展前景。但能量消耗非常高, 成形精度有待进一步提高。DTM 公司推出了系列 Sinterstation 成形机及多种成形材料, 其中 SOMOS 材料具有橡胶特性, 耐热、抗化学腐蚀, 用该材料制造出了汽车上的蛇形管、密封垫等柔性零件。EOS 公司研制了 PA3200GF 尼龙粉末材料, 用其制作的零件具有较高的精度和较低的表面粗糙度。

(2) 光固化立体造型 (SL—Stereolithography, or SLA)。将计算机控制下的紫外激光按预定零件各分层截面的轮廓轨迹, 对液态光敏树脂进行逐线扫描, 被扫描的树脂薄层产生光聚合反应固化形成零件的一个截面, 再敷上一层新的液态树脂进行扫描加工, 如此重复直到整个原型制造完毕。这种方法的特点是精度高、表面质量好, 能制造形状复杂、特别精细的零件, 不足是设备和材料昂贵, 制造过程中需要设计支撑。

(3) 叠层制造 (LOM—Laminated Object Manufacturing)。根据 CAD 模型各层切片的平面几何信息对箔材进行分层实体切割。首先利用激光控制装置进行 X-Y 平面切割运动, 将铺在工作台上的一层箔材切成最下一层切片的平面轮廓, 随后工作台下降一个切片高度, 箔材送进机构又将新的一层箔材铺上并用热压辊碾压使其牢固地黏结在已成形的箔材上, 激光再次进行切割运动并切出第二层平面轮廓, 如此重复直至整个零件制作完成。LOM 的主要特点是设备和材料价格较低、制件强度较好、精度较高。Helisys 公司研制出多种 LOM 工艺用的成形材料, 可制造用金属薄板制作的成形件, 该公司

还开发了基于陶瓷复合材料的 LOM 工艺。

(4) 激光熔覆成形 (LCF——Laser Cladding Forming)。LCF 技术的工作原理与 SLS 技术基本相同,通过对工作台的数控,实现激光束对粉末的扫描、熔覆,最终成形出所需形状的零件。研究结果表明:零件切片方式、激光熔覆层厚度、激光器输出功率、光斑大小、光强分布、扫描速度、扫描间隔、扫描方式、送粉装置、送粉量及粉末颗粒的大小等因素均对成形零件的精度和强度有影响。激光熔覆成形能制成非常致密的金属零件,因而具有良好的应用前景。美国 Michigan 的 POM 公司正在研制直接金属成形 (Direct Metal Deposition, DMD) 技术,用激光融化金属粉末,能一次制作出质地均匀、强度高的金属零件。

(5) 激光近形制造 (LENS——Laser Engineering Net Shaping)。LENS 技术由美国 Sandia National Lab 提出,它将快速成形技术 (RP) 和激光熔覆技术 (Laser Cladding) 相结合,快速获得致密度和强度均较高的金属零件。其方法是使用大功率 Nd:YAG 激光器将激光束聚焦在金属基体上熔化一个局部区域——熔池,同时通过三个分立的粉末喷嘴从三个等角方向向激光熔化的熔池里喷射金属粉末,金属粉末熔化后并在二维工作台平面运动的作用下形成一层新金属层,然后系统抬升一个分层厚度,新金属层继续沉积,如此层层叠架制成金属零件。该种技术已经制作出不锈钢、工具钢、钛合金等零件。

1.3.1.4 激光快速成形技术的发展现状

美国 3DSystems 公司 1988 年生产出世界上第一台 SLA250 型光固化快速成形机,开创了激光快速成形技术迅速发展和推广的新纪元。美国在设备研制、生产销售方面在全球占主导地位,其发展水平及趋势基本代表了世界的发展水平及趋势。欧洲和日本也不甘落后,纷纷进行相关技术研究和设备研发。中国香港和中国台湾比内地起步早,台湾大学拥有 LOM 设备,台湾各单位及军方安装多台进口 SL 系列设备。香港生产力促进局和香港科技大学、香港理工大学、香港城市大学等都拥有 RP 设备,其重点是关键技术的应用与推广。内地自 20 世纪 90 年代初开始进行研究,现有西安交通大学、华中科