国防科工委“十五”规划专著

# 激光立体成形

## ——高性能致密金属零件的快速自由成形

黄卫东　林鑫　陈静　刘振侠　李延民　著

西北工业大学出版社

北京航空航天大学出版社　北京理工大学出版社
哈尔滨工业大学出版社　哈尔滨工程大学出版社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

**图书在版编目(CIP)数据**

**激光立体成形/黄卫东等著. —西安:西北工业大学出版社,**2007.11
**国防科工委"十五"规划专著**
ISBN 978-7-5612-2159-4
Ⅰ.**激…** Ⅱ.**黄…** Ⅲ.**激光加工** Ⅳ. TG665
**中国版本图书馆** CIP **数据核字**(2007)**第** 150413 **号**

# 激光立体成形

**黄卫东 等著**
**责任编辑 雷 军 责任校对 季苏平**
**西北工业大学出版社出版发行**
**西安市友谊西路** 127 **号**(710072) **发行部电话:**029-88493844,88491757
http://www.nwpup.com
**陕西向阳印务有限公司印制 各地书店经销**
**开本:**850×1 168 1/32 **印张:**11.375 **字数:**274 **千字**
2007 **年** 11 **月第** 1 **版** 2007 **年** 11 **月第** 1 **次印刷** **印数:**1~2 000 **册**
ISBN 978-7-5612-2159-4 **定价:**23.00 **元**

# 国防科工委“十五”规划专著编委会

（按姓氏笔画排序）


主　任：张华祝

副主任：陈一坚　屠森林

编　委：王文生　王泽山　卢伯英　乔少杰
刘建业　张华祝　张近乐　张金麟
杨志宏　杨海成　肖锦清　苏秀华
辛玖林　陈一坚　陈鹏飞　武博祎
侯深渊　凌　球　聂　武　谈和平
屠森林　崔玉祥　崔锐捷　焦清介
葛小春

# 总　序

国防科技工业是国家战略性产业，是国防现代化的重要工业和技术基础，也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来，在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下，国防科技工业广大干部职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中，取得了举世瞩目的辉煌成就；研制、生产了大量武器装备，满足了我军由单一陆军，发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其他技术兵种在内的合成军队的需要，特别是在尖端技术方面，成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术，使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备，使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路，建立了专业门类基本齐全，科研、试验、生产手段基本配套的国防科技工业体系，奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础；掌握了大量新技术、新工艺，研制了许多新设备、新材料，以“两弹一星”、“神舟”号载人航天为代表的国防尖端技术，大大提高了国家的科技水平和竞争力，使中国在世界高科技领域占有了一席之地。党的十一届三中全会以来，伴随着改革开放的伟大实践，国防科技工业适时地实行战略转

移，大量军工技术转向民用，为发展国民经济做出了重要贡献。

国防科技工业是知识密集型产业，国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50 多年来，国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍，他们具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神，勇挑重担，敢于攻关，为攀登国防科技高峰进行了创造性劳动，成为推动我国科技进步的重要力量。面向新世纪的机遇与挑战，高等院校在培养国防科技人才，产生和传播国防科技新知识、新思想，攻克国防基础科研和高技术研究难题当中，具有不可替代的作用。国防科工委高度重视，积极探索，锐意改革，大力推进国防科技教育特别是高等教育事业的发展。

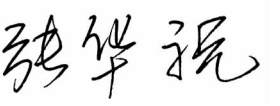
高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具，但受种种客观因素的影响，现有的教材与专著整体上已落后于当今国防科技的发展水平，不适应国防现代化的形势要求，对国防科技高层次人才的培养造成了相当不利的影响。为尽快改变这种状况，建立起质量上乘、品种齐全、特点突出、适应当代国防科技发展的国防特色专业教材体系，国防科工委全额资助编写、出版 200 种国防特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量，在广泛动员全国相关专业领域的专家学者竞投编著工作的基础上，以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的 100 多位专家、学者，对


需要全本请访问 www.ertongbook.com

经各单位精选的近550种教材和专著进行了严格的评审，评选出近200种教材和学术专著，覆盖航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与工程、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术、核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者，他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、华北工学院、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学、西安交通大学等，具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中，国防特色专业重点教材和专著的出版，将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出，进入21世纪，我国进入了全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新的发展阶段。全面建设小康社会的宏伟目标，对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展，提升国防实力，需要造就宏大的人才队伍，而教育是奠基的柱石。全面振兴国防科技工业必须始终把发展作为第一要务，落实科教兴国和人才强国战略，推动国防科技工业走新型工业化道路，加快国防科技工业科技创新步伐。国防

科技工业为有志青年展示才华，实现志向，提供了缤纷的舞台，希望广大青年学子刻苦学习科学文化知识，树立正确的世界观、人生观、价值观，努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任，创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好，国防科技工业的明天将再创辉煌。



# 前　言

国防工业是挑战制造技术能力极限的工业领域。装备优势已经成为现代战争越来越重要的决胜因素，世界强国都力图应用最先进的技术获得装备优势。不断发展的先进装备对制造技术提出一个又一个亟待解决的难题，解决这些难题则要求把各种传统技术的能力都发挥到极致，而在如此仍然不能解决问题的情况下，就须呼唤新的更先进的技术问世。因此，国防工业挑战极限的应用需求是发展先进技术的最强劲的持续的推动力，许多先进新技术都溯源于国防工业，再辐射到其他民用工业领域。

激光立体成形就是这样一个首先是面对国防工业制造技术需求而发展起来的先进技术，同时，它作为一种先进的零件修复技术也为建设循环经济和节约型社会提供了一种可以被广泛应用的再制造技术。

著者在 1995 年提出激光立体成形技术的构思，在对这一技术最初研究和探讨的几年时间里，所有初次接触到这一概念的人大都认为，激光立体成形都还只是一个十分新颖和大胆的想法，其实用化似乎是那样的遥不可及。如今，无论是在西方发达国家还是在国内，激光立体成形技术的先进性和实用性已经得到广泛认同，展示出

十分诱人的发展前景。在国防和民用领域的政府部门、研究机构、工厂中越来越多的人对激光立体成形技术表示出高度的关注，并投入巨大的热情去发展和应用这一先进新技术。然而，作为一个发展仅仅十余年的新技术，在著者成书之前，还没有一本系统论述激光立体成形技术的专著问世，相关的技术和理论只散见于大量的期刊和会议文献中。为了促进激光立体成形技术的发展，我们系统地总结了十余年来在激光立体成形方面的研究成果，同时也吸纳了世界上这一领域学者反映在学术刊物、会议和网络中的研究成果，撰写了这部著作，希望对相关领域的研究和应用工作有所帮助。

全书内容共分 6 章：

第 1 章回顾了激光立体成形技术的发展历程，重点评述了快速原型技术、激光熔覆技术和激光立体成形技术的特点、应用背景和国内外的发展状况。

第 2 章探讨了激光立体成形技术的一些主要工艺问题；对不同工艺参数对成形特性的影响规律进行了总结。

第 3 章从快速凝固基础理论出发，讨论了激光立体成形件的材料微观结构特征和相及组织形成机理。

第 4 章阐述了激光立体成形的理论模型和数值分析方法；总结了激光熔凝及熔覆过程理论模型的历史发展过程；讨论了激光熔凝及熔覆的基本问题及各类数值模型，并对这些模型进行了分析比较；详细介绍了激光立体成形数值模拟的方法。

第 5 章讨论了激光立体成形过程与成形件的力学行为，包括成形件的内应力和变形形成规律及主要影响因素，激光立体成形过程裂纹形成机理，激光立体成形件的力学性能和影响因素，以及消除成形缺陷、获得优良力学性能的工艺方法。

第 6 章简要介绍了激光立体成形技术的应用情况，包括在航空、航天、汽车工业、模具制造、医学、零件修复及合金设计等领域的一些应用实例。

本书内容结构框架由黄卫东规划，第 1 章由黄卫东撰写，第 2 章由李延民撰写，第 3 章由林鑫撰写，第 4 章由刘振侠撰写，第 5 章由陈静撰写，第 6 章由陈静和林鑫撰写，最后，黄卫东对全书进行审定、修改和定稿。书中的大部分内容取材于黄卫东负责的课题组及其所指导的研究生的工作，除了几位作者所做的研究外，还包括杨森、冯莉萍、杨海欧、薛蕾、谭华、张凤英、张霜银、赵晓明和杨健等研究生的工作，第 6 章中关于激光立体成形在口腔医学中的应用由第四军医大学高勃提供素材。

由于激光立体成形是一个正在迅速发展的新技术领域，许多研究工作还远远不够成熟，加之作者水平有限，书中难免有不当甚至错误之处，衷心欢迎读者批评指正。

本书反映的研究工作得到了航空科学基金、国家自然科学基金、科技部、国防科工委和解放军总装备部，以及诸多研究院所和工厂的支持；西北工业大学为有关研究工作提供了良好的设施和条件；本书的出版得到了国

防科工委重点专著计划的支持，西北工业大学出版社对书稿的编辑做了大量卓有成效的工作。在此衷心感谢所有对本书面世做出贡献的单位和人士！

作　者

2007 年 11 月 19 日



需要全本请访问 www.ertongbook.com

# 目　　录


## 第 1 章　绪论

1.1　激光立体成形的技术原理和主要特点 …… 1
1.2　发展历史 …… 5
参考文献 …… 21

## 第 2 章　激光立体成形工艺特性

2.1　激光立体成形装备系统 …… 32
2.2　激光立体成形工艺特性 …… 41
参考文献 …… 76

## 第 3 章　激光立体成形组织形成原理

3.1　激光近快速凝固理论基础 …… 78
3.2　柱状晶/等轴晶生长转变 …… 107
3.3　激光熔池形状对微观组织的影响 …… 114
3.4　激光立体成形的典型组织特征 …… 126
参考文献 …… 156

## 第 4 章　激光立体成形的理论模型和数值分析方法

4.1 概述 …… 164
4.2　激光熔凝的数学模型及分析 …… 192
4.3　激光熔凝控制方程的数值解法 …… 204
4.4　激光、粉末和基体相互作用的数学模型及数值分析 …… 221
参考文献 …… 236

## 第 5 章　激光立体成形过程中的力学行为

5.1　激光立体成形内应力及其产生原因…… 244
5.2　残余应力和残余变形…… 250
5.3　激光立体成形过程中的裂纹…… 264
5.4　激光立体成形结构件的力学性能…… 283
参考文献 …… 300

## 第 6 章　激光立体成形技术的应用与发展

6.1　金属零件的激光立体成形…… 305
6.2　激光成形修复 …… 326
6.3　合金设计…… 340
参考文献 …… 348

# 第1章 绪 论

激光立体成形技术是从20世纪90年代初期发展起来的一项先进制造技术，能够实现高性能复杂结构金属零件的无模具、快速、全致密近净成形。该技术可以用于承受强大力学载荷的三维实体金属零件的快速制造，也可应用于零件上具有较复杂形状、一定深度制造缺陷、误加工损伤或服役损伤的修复。无论是激光立体成形，还是修复的零件，其力学性能都同锻件性能相当，这正是这一新技术引人注目之处。

材料加工技术最近的主要发展方向，是追求短流程、低能耗、高柔性、环境友好、成形与组织性能控制一体化的先进技术。集成激光技术、计算机技术、数控技术和材料技术等诸多现代先进技术所形成的激光立体成形技术，由于具备了上述先进材料加工技术所要求的几乎所有的特征，而得到材料加工界的青睐，在短短的10余年间迅速发展起来，成为许多加工和应用领域众所瞩目的重要新技术。

## 1.1 激光立体成形的技术原理和主要特点

激光立体成形技术的基本原理是，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填满给定的二维形状，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，但实践中很少采用这种方法，所以本

书仅仅讨论基于同步送粉激光熔覆的激光立体成形技术。

可以看出，激光立体成形技术与 20 世纪 80 年代中后期发展起来的快速原型制造技术[1-8]具有完全相同的成形原理，都属于快速成形技术。快速成形技术的增材制造原理，是制造技术发展史上革命性的新概念，在其发展初期，快速成形技术主要被用于零件原型的快速制造，因此它被普遍称为“快速原型”制造技术，或“RP(Rapid Prototyping)技术”。RP 技术使用的材料十分广泛，有纸、蜡、塑料、陶瓷、金属等。由于 RP 技术主要关心零件的原型而不是直接使用的零件，因此它更关心成形件的形状和尺寸精度，并不追求高的力学性能。

本书所述的激光立体成形技术，是将 RP 技术的快速成形原理与激光熔覆技术结合起来，所形成的一种制造高性能致密金属零件的快速成形技术。与通常的 RP 技术的区别在于，激光立体成形技术以形成可以直接使用的承载力学载荷的金属零件为目标，不仅关注其快速成形特性，同时也关注获得很高的力学性能。RP 技术中的激光选区烧结技术，即 SLS(Selected Laser Sintering)技术，也可以制造金属零件，但所制造的零件不致密，一般不能直接作为承受力学载荷的零件使用。虽然可以通过各种后续处理提高零件的致密性和力学性能，但还是难以达到正常金属零件使用所需的力学性能要求。而采用激光立体成形技术制造的金属零件，其强度和塑性已经达到锻件的水平。

原则上，任何一种材料加工技术，如果它能实现高性能的二维片层制造，又能把这些二维片层材料牢固地结合起来，就可以实现高性能三维零件的快速成形制造。因此，快速成形技术的种类可以是多种多样的，如快速原型技术就有几十种，相关的专利有数百个之多。但目前可以直接制造其力学性能相当于金属铸件和锻件水平的金属零件的快速成形技术，主要是本书所述的将 RP 技术的快速成形原理与同步送粉激光熔覆技术结合起来所形成的激光立体成形技术。

激光熔覆技术本来是在一种金属的表面熔覆另一种金属材料，以改善其耐磨、耐蚀等性能的表面改性技术。激光熔覆技术的一个显著特点是，熔覆层金属与基体金属之间是牢固的冶金结合。激光立体成形比一般激光熔覆更特别的是，由于是同种材料的多层熔覆，熔覆层间的结合质量更容易得到保证。同时，由于激光的高能量密度特性，熔覆层金属的显微组织十分细小均匀，因而具有良好的硬度、塑性和耐腐蚀性能。由于这些特点，使激光立体成形技术具备了快速制造高性能致密金属零件的可能性。

与传统加工技术相比，激光立体成形技术有如下主要特点：

（1）制造过程柔性化程度高。由于摆脱了模具、专用工具和卡具的约束，因而能够方便地实现多品种、变批量零件加工的快速转换。变换不同零件的制造过程主要是通过修改计算机文件来实现，硬件基本不变或变化很少。

（2）产品研制周期短，加工速度快。生产全过程简化为零件的计算机设计、激光立体成形零件近净形毛坯和少量机械加工三步，比传统加工技术的工序显著减少，而且省去了设计和加工模具的时间和费用，使产品研制周期短、加工速度快。

（3）真正实现制造的数字化、智能化、无纸化和并行化。零件设计、几何建模、分层和工艺设计全过程均在计算机中完成，实际的制造过程也在计算机控制下进行。

（4）所制造的零件具有很高的力学性能和化学性能，不但强度高，而且塑性也非常高，耐腐蚀性能也十分突出。激光立体成形的原材料为金属粉末，零件成形是在高能激光作用下的快速熔化和凝固过程中完成的，使零件材料几乎是完全致密的，显微组织十分细小均匀，没有传统铸件和锻件中的宏观组织缺陷。这种优越的组织可以同时提高材料的强度、塑性和耐腐蚀性能。应该指出，激光立体成形技术在提高金属零件力学性能上的潜力还没有被充分发掘出来。这是因为，由于激光立体成形是近些年才发展起来的新技术，目前还没有激光立体成形专用金属粉末。用于激光立

体成形的原材料，都是借用粉末冶金和热喷涂用的金属粉末，或者用铸造合金或锻造合金制成的粉末。我们知道，材料和工艺是密切相关的，各种现有的合金牌号，都是同特定的加工工艺相联系的，如铸造合金、锻造合金、粉末冶金合金等等。合金设计不仅要考虑材料的使用性能，还要考虑材料的加工性能。根据激光立体成形工艺特性设计专用合金，还有进一步提高零件力学性能和化学性能的广阔空间。

（5）实现多种材料以任意方式复合的零件制造技术。由于是逐点制造，原则上可以在制造过程中根据零件的实际使用需要任意改变其各部分的成分和组织，实现零件各部分材质和性能的最佳搭配。这可以通过一个由计算机控制的多路送粉器，按照设定程序，在任意时刻把成分不同的金属粉末以不同的配比混合均匀，送入激光熔池中实现合金成分的实时控制；而通过控制送粉速率、激光参数和数控机床的运动速度，还可以对凝固组织进行控制。这个特点，是过去任何材料加工技术无法实现的。它给零件设计、减重、降低成本和最大限度发挥使用性能，开创了无尽的可能性。

（6）产品零件的尺寸大小和复杂程度对加工难度影响很小。通过采用不同种类、不同功率大小的激光器，控制不同的光斑尺寸大小，采用不同大小的数控工作台，可以制造出小至毫米量级，大至数米以上的金属零件，也可以加工出具有复杂形状内腔以至封闭内腔的零件。

（7）有进一步降低加工成本的广阔空间。激光器及其运行成本在不断降低，如大功率二氧化碳激光器的运行成本仅为 10 年前的 1/10 左右。工业用大功率固体激光器已经成熟，其运行成本比气体激光器更低。而新近发展的大功率半导体激光器具有很高的能量转换效率和更低的运行成本。此外，激光立体成形是全数字化技术，对人工需求很少，随着人力成本越来越高，激光立体成形相对于需要大量人力的传统加工技术的成本会变得越来越低。在现阶段，激光立体成形还主要是在要求高性能、小批量、快速反应


需要全本请访问 www.ertongbook.com