

学校编码: 10384 分类号_____ 密级_____

学号: 200229004 UDC_____

厦门大学硕士学位论文

基于 LG/LC 快速成型的理论与研究方法

Theory and research method of LG/LC

Rapid Prototyping

张慧杰

指导老师姓名: 胡国清 教授

申请学位级别: 硕 士

专业名称: 精密仪器及机械

论文提交日期: 2004 年 月

论文答辩日期: 2004 年 月

学位授予日期: 2004 年 月

学位授予单位: 厦 门 大 学

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2004 年 月

厦门大学学位论文原创性声明

兹提交的学位论文,是本人在导师指导下独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考的其他个人或集体的研究成果,均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文而产生的权利和责任。

声明人:

2004年 月 日

摘 要

本文对快速原型研究中的激光熔覆 LC(laser cladding)、LG(laser/LENS Generating)两种方法进行了理论上的探索和研究,对 LG 方法建立数学模型,从理论上推导出了在无支撑的情况下能直接成型的最大角的数学公式,即原型外缘与水平面的最小夹角的数学公式,分析了各种因素对夹角的影响,利用 ABS 材料,通过实验验证该数学推导理论的正确性;并且利用 Matlab 模拟了激光熔覆成型过程中各种因素对熔池深度的影响。这种数学公式与理论对 LG、激光熔覆方式实际的设计、制造过程起到重大的指导作用。

本论文的主要研究工作有:

- 1、 分析快速原型技术中各种方法的原理及各自的特点,确定对 LG、激光熔覆制造方法进行深入研究。探索在原型制造实施之前,就可以按照要求完成对制造参数的设计的可能方法;
- 2、 根据三个假设条件,建立了在 LG 技术的加工过程中的微观物理模型,并对其理论分析,推导出计算原型外缘与水平面的最小角夹角 β_{\min} 的数学模型,建立 LG 制造的微观模型和数学模型;
- 3、 用 Matlab 仿真,分析工作温度 t , 熔覆深度 d , 液体球半径 R 对 β_{\min} 的影响。还将铜和锡作为分析材料,进行实例分析,导出相关参数与 β_{\min} 的对应关系。从而,可以在原型制造实施之前,预测不同材料在无支撑的情况下,外缘成型的最大斜度,以及各种可能因素对其的影响;
- 4、 对激光熔覆制造模型进行理论分析及数值仿真,模拟出熔池深度模型,分析各种参数如激光功率、扫描速度、送粉速度、激光光束直径等对

熔池深度的影响。从而可以在原型制造实施之前，通过设置相关参数对成型过程和原型形状达到较好的控制；

5、 利用 FDM 3000 快速原型机模拟 LG 成型，验证无支撑情况下，ABS P400 能成型最小角与理论最小角相吻合。

关键词：快速原型；Matlab 仿真；激光熔覆

厦门大学博硕士论文摘要库

ABSTRACT

The two kinds of methods of Rapid Prototyping(RP), Laser Cladding(LC) and Laser Generating (LG) are studied theoretically in this paper. In the LG process without support material, the mathematical model was used to calculate the minimal angle between prototype outward edge and horizon is deduced. And how the angle value is influenced by various parameters is analyzed. The experiments are made to prove this model by ABS plastic. For LC, the changes of the melt-pool depth because of various parameters changes are simulated by MATLAB. These researches will play very important roles in optimization designing works and manufacturing process.

The mainly researching contents in this thesis:

1. After analyzing the principles and the features of various RP techniques, we determined to develop research basing on LG and LC. The mainly reasons are the two methods can be used to manufacture metal prototypes directly, and there are some bottleneck in the producing process. So, we searched for the possible methods that we can design some parameters according to prototype requirements before manufacturing.
2. Under three hypotheses, the microphysical model of LG is made up and analyzed it in theoretical. The mathematical model of the minimal angle β_{\min} that is the minimal angle between prototype outward edge and horizon is deduced theoretically.

3. How the β_{\min} is influenced by various parameters such as the work temperature t , cladding depth d and radius of liquid sphere R is analyzed by MATLAB simulating. Then taking Copper and Tin as analyzing materials, the corresponding relationships among these parameters and β_{\min} are calculated.

So that, before prototyping manufacturing, we can estimate the maximal outward gradient according to different materials without support material, and the possible influences by various parameters.

4. The melt-pool depth model of LC is made up by analyzing and simulating theoretically. How the molten pool depth is influenced by the parameters such as laser power, scanning velocity, powder velocity and laser diameter. So that, the shape of the metal prototype and manufacturing process can be controlled perfectly by designing the appropriate parameters in advance.

5. Because of similar manufacturing process of LG technique and FDM technique, we have done the experiment by FDM 3000 machine with Stratasys Inc., and get rid of the support material from FDM tips. This experiment result can be proven that the theoretical minimal angle is approximation to practical minimal angle.

Keyword: Rapid Prototyping; MATLAB simulation; Laser Cladding

目录

第一章	绪论	1
1.1	快速成型制造技术的国内外概况	1
1.2	RP 技术的应用和发展趋势	9
1.3	本论文主要研究的工作	13
第二章	快速成型制造的原理、方法及特点	14
2.1	RP 系统的基本工作原理	14
2.2	各种快速成型技术分析	15
2.3	快速成型技术的特点	30
2.4	小结	30
第三章	快速成型微观结构的研究	32
3.1	Laser Generating 微观结构的研究	32
3.2	建立微观物理模型	33
3.3	理论分析	35
3.4	特例分析	40
3.5	小结	45
第四章	激光熔覆成型熔池深度分析	46
4.1	激光熔覆技术	46
4.2	数学模型的建立	47
4.3	理论计算	49

4.4 数值分析.....	53
4.5 激光作用效率 η 的计算.....	59
4.6 小结.....	62
第五章 实验验证.....	63
5.1 实验目的.....	63
5.2 实验仪器及材料简介.....	63
5.3 实验步骤.....	65
5.4 实验结果分析.....	70
5.5 小结.....	75
第六章 结论.....	76
致谢.....	78
参考文献.....	79
符号表.....	85
硕士期间发表学术论文及获奖情况.....	88

Chapter I Introduction	1
1.1 Review of Rapid Prototyping(RP)	1
1.2 The application and developing of RP technology	9
1.3 Major research tasks of the thesis	13
Chapter II Primary principle, methods and characterization of RP technology	14
2.1 Work Principle of RP	14
2.2 The analysis of various RP methods	15
2.3 The characteristics of RP	30
2.4 Summary	30
Chapter III Research of Microstructure in RP	32
3.1 Research of Microstructure of Laser Generating	32
3.2 The building of Micro physical model	33
3.3 The theoretical analysis	35
3.4 The analysis of special cases	40
3.5 Summary	45
Chapter IV The analysis of melt-pool depth about Laser Cladding	46
4.1 Laser Cladding Technology	46
4.2 The building of mathematical model	47

4.3	The calculation in theory	49
4.4	Numerical analysis	53
4.5	The calculation of Laser efficiency η	59
4.6	Summary	62
Chapter V Experiment		63
5.1	The purpose of the experiment	63
5.2	The introduction of the apparatus and material	63
5.3	The experiment process	65
5.4	The analysis of experimental results	70
5.5	Summary	75
Chapter VI Conclusion		76
Acknowledgements		78
References		79
List of Symbols		85
Publications and Prizes		88

第一章 绪论

1.1 快速原型制造技术的国内外概况

快速原型制造技术(Rapid Prototyping Manufacturing简称RPM), 又称快速成型技术, (Rapid Prototyping,简称RP技术)。RP技术可以在无需准备任何模具、工具和工装卡具的情况下, 直接根据产品设计(CAD)数据, 快速制造出新产品的样件、模具或模型, 与传统的铸、锻、轧、焊、车、铣、刨、磨等一系列加工过程相比, 原型制造的加工过程大大缩短了加工周期并降低了产品研制的成本, 对促进企业产品创新、提高产品竞争力有积极的推动作用。它为技术人员之间, 以及技术人员与企业决策者、产品的用户等非技术人员之间提供了一个更加形象、完整、方便的工程交流工具, 这就是 RP 技术所具有的潜在的革命意义。快速成型技术已经广泛应用于电子信息、汽车、通讯、机械交通、轻工家电、航天航空、医疗器械、塑料、模具、建筑模型等众多行业。根据美国 Wohlers Associates 咨询公司 2001 年的 RP 市场调查报告: 2000 年, 全世界 23 个 RP 设备制造厂商共生产设备 1320 台, 累计达 6755 台, 安装于 58 个国家; 2000 年共制造了 300 万个原型, 其中北美占 45%, 亚太占 28.6%, 欧洲占 24.6。全球大约 384 家 RP 公司, 其产值约 2.97 亿美元, 相对于 1999 年增长了 14.8%, 这个增长速度比 1996 年的 43.1% 要逊色不少, 但比前两年要有所好转。快速原型与制造技术如此受到青睐, 主要原因是它可以快速将设计思想物化为具有一定结构和功能的三维实体, 并且是低成本制作产品原型和零件, 这大大满足了当竞争日益激烈的市场对新产品快速开发和快速制造的要求^[1]。

1.1.1 RPM 技术产生的背景

随着全球市场一体化的形成, 制造业的竞争十分激烈, 产品的开发速度日

益成为市场竞争的主要矛盾。在这种情况下，自主快速产品开发（快速设计和快速工模具）的能力（周期和成本），成为制造业全球竞争的实力基础。同时，制造业为满足日益变化的用户需求，又要求制造技术有较强的灵活性，能够以小批量甚至单件生产而不增加产品的成本。因此，产品开发的速度和制造技术的柔性就变的十分关键了^[2]。

快速原型制造技术（RPM）就是在这种社会背景下，于 80 年代后期产生于美国，并很快扩展到日本及欧洲，是 20 多年来制造技术领域的一项重大突破。

1.1.2 国外概况

美国 3M 公司的 Alan J. Hebert(1978)、日本的小玉秀男(1980)、美国 UVP 公司的 Charles W. Hull(1982) 和日本的丸谷洋二(1983)，在不同的地点各自独立地提出了 RP 的概念，即用分层制造产生三维实体的思想。Charles W. Hull 在 UVP 的继续支持下，完成了一个能自动建造零件的称之为光固化快速成型（Stereolithography Apparatus 简称 SLA）的完整系统 SLA-1，1986 年该系统获得专利，这是 RP 发展的一个里程碑。同年，Charles W. Hull 和 UVP 的股东们一起建立了 3D System 公司。与此同时，其它的成形原理及相应的成形系统也相继开发成功。1984 年 Michael Feygin 提出了薄材叠层（Laminated Object Manufacturing，以下简称 LOM）的方法，并于 1985 年组建 Helisys 公司，1992 年推出第一台商业成形系统 LOM-1015。1986 年，美国 Texas 大学的研究生 C. Deckard 提出了选择性激光烧结(Selective Laser Sintering，简称 SLS)的思想，稍后组建了 DTM 公司，于 1992 年开发了基于 SLS 的商业成形系统 Sinterstation。Scott Crump 在 1988 年提出了熔融成形(Fused Deposition Modeling，简称 FDM)的思想，1992 年开发了第一台商业机型 3D-Modeler。自从 80 年代中期 SLA 光成形技术发展以来到 90 年代后期，出现了几十种不同的 RP 技术，除前述几种外，典型的还有 3DP 等。但是，SLA、LOM、

SLS和FDM四种技术，目前仍然是RP技术的主流。国外现在所应用的成型材料也已经较为丰富。

在美国主要的 RP 技术公司的研究开发情况：3D System Inc. 研究以 SLA 工艺及其应用为主，并开发成功分辨率为 300dpi 的多喷头 3D-MJM 系统；DTM Corp. at Austin 以 SLS 为主；Helisys Inc. 以 LOM 为主；Stratasys Inc. 开发了 FDM 和桌面制造系统 Genisys；BPM 公司开发弹道粒子制造 (Ballistic Particle Manufacturing) 技术。而美国一些大学也积极地展开 RP 技术的研究工作：MIT 以 Emanuel Suchs 为首，开发 3DP 为主；The University of Dayton 以 Allan J. Lightman 为首从事多种 RP 工艺的研究，每年在这所大学召开国际 RPM 学术会议；The University of Texas at Austin 以 Joseph J. Beaman 为首，主要以 SLS 工艺研究为主，国际 SFF 学术会议在此召开；Carnegie Mellon University 以 Lee E. Weiss 为首，主要研究 RPM 在微机械中的应用。另外，美国还有多所大学和研究机构从事 RP 新工艺、RP 技术的应用以及直接制造陶瓷或金属原型等多方面的研究。

日本也大力发展 RP，其主要的研究单位有：东京大学以中山威雄，从事 SLA 和 LOM 技术的研究；SONY 公司属下的 D-MEC，从事 SLA，推出 SCS 型设备；Mitsubishi 公司属下的 CMET INC. 从事 SLA，推出 SOUP 设备，在日本已占据相当市场；Mitsui 公司属下的 MES 从事 SLA，推出 COLAMM 成形机；Du Pont/Teijin-Seiki 公司从事 SLA，推出 SOMOS。西欧许多研究机构和厂商也将目光瞄准这一领域，如：德国 Electro-Optical System GmbH 即 EOS，主要从事 SLA 和 SLS；瑞典 Sparx AB (Larson Brothers CO. AB) 推出“Hot Plot Rapid Prototyping”系统，类似于 Helisys 的 LOM；法国 Laser 3D 推出 RP System^[4]。

RP 技术的巨大优点及其发展速度已引起各国政府的高度重视，他们纷纷确立了一些 RP 重点研究项目进行资助。美国国家自然科学基金委员会，

ARPA(Advanced Research Projects Agency)和其它联邦委员会都投入较大资金向一些大学、公司提供资助和贷款等以推动 RP 学术研究与应用开发研究。例如,许多大学 RP 研究课题均得到 NSF 的资助;ARPA 资助一些公司和研究机构深入研究如何应用 RP 方法较经济地制造无污染的陶瓷近成形零件技术;MIT 研究 3D-P 技术的课题组也得到了 ARPA 和 MIRP 的资助。欧共体也设立过多个针对 RP 的项目计划以扩大和深化 RP 技术在欧洲的研究、开发和应用。如,受欧共体支持的 EARP(European Action on Rapid Prototyping)的宗旨就是鼓励和促进其成员间技术信息共享和在 RPT(Rapid Prototyping Technology)领域 R&D 合作,其中的“Work Area, Med-Earp”就是专门支持 RP 在医学上应用的项目。

国外大学在分层方式的研究^[4]. RP 数据处理过程需要将 CAD 模型数据(STL 文件)按一定方向分层为层片模型数据(CLI 文件),以便于加工层片从而堆积成实体。目前,分层方式已经由传统的二维的平面分层发展为空间的曲面分层,具体而言,分层方式的演变有以下两种:平面演变为曲面;(美国 DAYTON 大学对此进行了研究);二维分层发展为三维分层;(美国 STANFORD 大学对此进行了研究)。

软件是 RPM 系统的灵魂。其中最为关键的又是 CAD 到 RP 接口的数据转换和处理软件。在 RPM 发展的初期,人们的注意力主要集中在工艺本身,而随着应用的不断深入,软件处理的精度和速度,软件对复杂模型的处理能力就成为应用中的一个主要瓶颈。国外的 RPM 公司和研究机构对此都非常重视并投入大量人力和资金进行软件的研究和开发。

国外的各大 RPM 系统生产商一般都开发自己的数据变换接口软件^[4],如 3D SYSTEM 公司的 ACES、QuickCast, Hellisys 公司的 LOMSlice, DTM

的 Rapid Tool, Stratasys 的 QuickSlice、SupportWorks、AutoGen, Cubital 的 SoliderDFE, Sander Prototype 的 protoBuild 和 ProtoSupport 等。

由于 CAD 与 RPM 的数据变换接口软件开发的困难性和相对独立性, 国外涌现了很多作为 CAD 与 RP 系统之间的桥梁的第三方软件, 这些软件一般都以常用的数据文件格式作为输入输出接口。输入的数据文件格式有 STL、IGES、DXF、HPGL、CT 层片文件等, 而输出的数据文件一般为 CLI。以下是国外比较著名的一些第三方接口软件。

- (1) **Bridge Works:** 由美国的 Solid Concept 公司在 92 年推出, 经不断改进, 现已发展到 Version4.0 以上。该软件可通过对 STL 文件特征的分析, 自动添加各种支撑。
- (2) **Magics:** 由比利时的 Materialise 公司在 93 年推出, 现已发展到 version4.2, 包括 Magics View, Magics RP, Magics SG, Contours Tools, CT-Modeler System, Mimics, CTM 等七个模块, 可以进行基于 STL 文件的显示、错误检验、自动添加支撑、分层、制造时间估计等处理, 还提供了各种对 CT 文件及 IGES 文件的有效处理。该软件功能广泛、性能优良、界面美观, 是一个优秀的第三方接口软件。
- (3) **SolidView:** 由美国的 Solid Concept 公司在 1994 年推出, 可以在 WINDOWS3.1, WIN95, WINNT 操作系统下进行 STL 文件的线框和着色显示, STL 文件的旋转、缩放等操作。
- (4) **STL Manager:** 由美国的 POGO 公司于 1994 年推出, 主要用于 STL 文件的显示和支撑的添加。
- (5) **StlView:** 这是一个由美国的软件工程师 Igor Tebelev 在业余时间所写的软件, 现已发展到 Version7.0。它可以从网上免费下载并使用

两周,同 SolidView 类似,这个软件可用于 STL 文件的显示和变换,同时它还有错误修复、添加支撑等功能。

- (6) **Surfacer—RPM:** 这是由美国的 Imageware 公司在 1994 年为其 Surfacer 软件增加的用于快速原型制造数据处理的模块。

其他第三方数据接口软件还有克莱梅森大学的 CIDES、Anthony D. Martin 开发的 ADMesh, XOX 公司的 SHAPES, Brock Rooney 的 Brockware, I-DEAS 的 RP 模块, CADD5 的 RP 模块等。由于数据接口软件的开发往往需要很高的专业水平,要耗费大量的财力和时间,现在国外出现了 RPM 生产商购买第三方数据接口软件的趋势。如 1996 年 3D SYSTEM 公司与 Imageware 公司达成协议,采用 Imageware 的 RP 一系列模块作为“3D Systems SL Toolkit”。而 Sanders Prototype 公司也采用了 STL-Manager 作为自己的数据接口软件。另外,德国的 F&S 公司也购买了 MAGICS 软件的部分模块。从技术角度说,数据转换和处理软件的难度集中在 STL 自动纠错、支撑的自动添加、快速模具制造时的实体空腔化或网格 (lattice) 化处理、扫描矢量的生成等环节。目前国外软件综合起来在这些方面都处理的比较好。国外现在软件有人工智能化的趋势。^[4]

国外RPM工艺装备的发展,目前RPM的工艺装备发展速度很快,前述四种RPM技术都已由许多公司开发了自己的装备。

美国主要的RPM生产商有 7 家,即 3Dsystemes、Helisys、DTM、Stratasys、Sanders、Prototype、Soligen、BPM、其中BPM由于经营不善,业已倒闭。日本有 6 家,即CMET、D—MEC、Teijin Selki、Kira Corp、Mitsui Zosen 和Denken Engineering、欧洲有 3 家,即德国的EOS、F&S。

1.1.3 国内概况

我国对这项新技术的研究从“八五”期间起步,在“九五”期间取得

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士学位论文摘要库