

激光先进制造技术

Laser Advanced Manufacture

郑启光 编著



华中科技大学出版社

激光先进制造技术

郑启光 编著

华中科技大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

激光先进制造技术/郑启光 编著
武汉:华中科技大学出版社, 2002年12月
ISBN 7-5609-2837-4

I. 激…
I. 郑…
II. 激光技术
IV. TN24

激光先进制造技术

郑启光 编著

责任编辑:钟小珉 万亚
责任校对:蔡晓璐

封面设计:潘 群
责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87545012

录 排:华中科技大学出版社照排室

印 刷:湖北恒吉印务有限公司

开本:850×1168 1/32 印张:9.25

字数:219 000

版次:2002年12月第1版 印次:2002年12月第1次印刷

印数:1—1 000

ISBN 7-5609-2837-4/TN·71

定价:18.00元

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

内 容 提 要

本书主要讲述激光先进制造技术中的激光与材料相互作用的基础知识和激光热加工工艺,并具体讲述了激光加工技术(包括激光打孔、标刻、焊接和激光表面改性)、激光快速成型技术和激光制备薄膜技术。为强调起见,专门用一章叙述了激光在微电子工业中的应用。全书共分八章,第七章介绍了激光加工成套设备系统。

本书在综合国内外激光加工和激光先进制造技术的应用成果的基础上,注意理论基础与工艺的结合,对各种激光加工的简单机制、工艺特点与参数及应用领域作了较详细的分析。

本书可供激光、机械和材料等专业相关方向的硕士研究生和高年级本科生作为教材使用,也可供从事激光加工的工程技术人员参考。

前 言

我们目前正处于激光开始向传统制造技术中许多工艺过程积极渗透的阶段,这之前的传统加工工艺贯穿整个加工制造行业。而激光加工(包括打孔、标刻、切割、焊接和表面热处理等)、激光快速成型、激光制膜和激光检测等技术大大推动了制造技术的迅速发展,新的先进制造技术——激光先进制造技术已经形成。激光先进制造技术在汽车、冶金、航空航天、机械、纺织、化工、建筑、造船和微电子工业等领域得到了广泛的应用,在有些行业(例如汽车行业)已达到了相当高的水平。

激光先进制造技术大致可分为以下几个方面,即激光加工技术、激光快速成型技术、激光检测技术和微电子器件激光制造技术等。

目前在激光先进制造技术中,激光加工技术占有重要的地位,被誉为“未来制造系统的共同加工手段”,将成为 21 世纪世界工业中的骨干产业。激光加工技术具有效率高、质量优、清洁、加工范围广、经济效益好、易进行自动化控制、能实现柔性加工和智能加工等特点,解决了传统加工中许多无法解决的难题。有人预测,激光加工和激光先进制造技术将引起一次新的工业革命。激光加工代表当前先进制造业的发展方向,各发达国家和先进的发展中国家都把激光加工技术作为提高生产效率和参与国际竞争的重要手段。

汽车工业是激光加工技术应用最多的领域之一,在一些发达国家(例如美国、德国、意大利、英国和日本)的汽车工业中,从切割、打孔、焊接、表面处理到新车型试制中,50%~70%的零件均采用激光加工技术来完成。据不完全统计,到目前为止,已有 4000 多台激光加工机用于汽车工业,这还不包括用于检测的小功率激光

器。

激光加工通常仍以激光切割为主,早期占激光加工中的 65%~75%,现仍占激光加工中的 35%~40%。激光切割具有切缝窄、切速快、精度高和易实现自动化等特点。

在汽车新车型样车试制和小批量生产中,大量采用三维和五维激光切割,这不仅省去了大量的样板及加工设备,大大缩短了生产准备周期,而且使车间生产柔性化,面积减少一半,节约了基本建设和技术改造的投资。例如美国的福特汽车公司已把五轴激光切割机用于新车型样车试制和短周期产品的生产。

激光焊接与传统焊接工艺相比较,最突出的优点在于焊缝窄、焊接变形小、焊缝区组织和性能与母材接近。激光薄板拼焊是将不同材质和不同板厚的冲压毛坯件采用激光拼焊在一起,可以达到最佳的材料和性能的组合,这既可提高材料的利用率,又可减少模具的数量。薄钢板激光焊接已取得了很大进展,尤其是汽(轿)车剪裁板的激光高速焊接,已在汽车制造业得到广泛应用。例如日本本田汽车公司从 1987 年开始进行薄板激光焊接,从轿车的侧围板开始,现已有 50 多种汽车车身板采用激光焊接工艺。在欧洲,德国的 BMW 汽车公司从 1987 年开始将激光加工用于汽车车身的批量生产,已建立了一个五轴激光加工中心,用于车顶外壳与框架的焊接。

激光表面热处理技术是激光加工技术中的一个重要方面,利用高功率密度激光束对金属零件表面进行处理,可对材料实现相变硬化(表面淬火、表面非晶化、表面重熔淬火),表面熔覆和表面合金化等表面改性工程。激光表面改性几乎可用于发动机中所有耐磨零件,如轮轴、曲轴、缸套、缸体、活塞环、环槽、排气门和阀座等。

激光快速成型技术是将激光技术与计算机、材料科学相结合,能产生很大效益的一项先进制造技术。它的主要功能是将三维数据快速转化为实体(或模具)。例如美国的 3D System 公司、日本

的 NTT 公司和 D-MEC 公司、德国的 EOS 公司,都在加强激光快速成型技术的开发和应用工作。

激光先进制造技术还有一种是激光制膜技术,激光制膜可分为激光物理气相沉积(LPVD)薄膜和激光化学气相沉积(LCVD)薄膜两种。利用脉冲激光可制备功能薄膜、结构薄膜,并可利用该法在低温下生长 Al_2O_3 、 SiO_2 、 TiO_2 、 SiC 陶瓷膜及类金刚石膜、高温超导膜和半导体膜及发光膜等。

本书以推广激光先进制造技术为目的,从讲述激光先进制造技术的基础知识出发,重点讲述激光加工技术、快速成型技术和激光制备薄膜技术的工艺及应用。对激光在微电子工业中的应用也作了较详细的描述。各章内容都注意到理论、实验和应用的有机结合。

本书是结合本人数十年的研究心得,参考了国内外学者的研究成果(包括本人成果)编写的。期望本书的出版对我国激光加工和先进制造技术的发展能有一定的帮助,并能对该领域的人才培养有所裨益。最后诚挚地欢迎读者批评指正。

最后值得一提的是,王金华老师为本书的出版做了大量工作,在此表示衷心的感谢。

郑启光

2001 年 12 月于华中科技大学



作者简介

郑启光 男，湖南衡阳人。1969年毕业于华中工学院，现任华中科技大学激光技术国家重点实验室教授、博士生导师。1971年至今主要从事激光加工和激光与物质相互作用的研究。共承担科研项目（包括国家攻关和国家自然科学基金项目等）20余项。获省部级奖7项（包括省部级一等奖一项、二等奖两项）。撰写专著两本（《激光与物质相互作用》和《激光热加工》）。在国内外发表学术论文150余篇。

目 录

第一章 激光先进制造技术基础	(1)
1.1 激光束特性	(1)
1.1.1 激光的相干性	(2)
1.1.2 激光束的形状与发散	(3)
1.1.3 激光束的亮度	(8)
1.1.4 激光束的聚焦特性	(8)
1.1.5 激光窗口和透镜材料	(15)
1.1.6 反射镜	(17)
1.1.7 激光束的光束质量	(19)
1.1.8 激光束质量因子 M^2 的概念 ^[8]	(19)
1.2 激光与固体材料的相互作用	(19)
1.2.1 表面效应	(19)
1.2.2 内部效应	(21)
1.3 材料的吸收和反射特性	(23)
1.3.1 材料的吸收特性	(23)
1.3.2 材料的反射率 ^[2]	(31)
1.4 激光加工的热源模型 ^{[9][10][11]}	(34)
1.4.1 热物理常数	(34)
1.4.2 几种典型激光加工的热源模型	(36)
1.4.3 激光打孔中热源模型的解	(40)
1.4.4 激光焊接	(44)
1.4.5 激光切割的热量传递	(51)
1.4.6 激光表面热处理中的热量传递	(53)
参考文献	(57)
第二章 激光器系统	(59)

3.4.1	激光清洗技术基础知识	(186)
3.4.2	激光清洗技术的优点	(188)
	参考文献	(188)
第四章	激光快速成型技术	(191)
4.1	激光快速成型工艺	(191)
4.1.1	分层制造快速成型技术	(192)
4.1.2	激光立体光刻(SL)制模技术	(194)
4.1.3	选择性激光烧结(SLS)制模技术	(200)
4.1.4	其它新的激光快速成型工艺及材料	(204)
4.2	激光快速成型系统软件与设备	(205)
4.2.1	激光快速成型系统软件 ^[7]	(205)
4.2.2	用于快速成型制模的激光器	(206)
4.2.3	激光快速成型设备 ^[8]	(207)
4.3	激光快速成型制作零件(或模具)的典型实例	(209)
	参考文献	(210)
第五章	激光制备薄膜技术	(212)
5.1	激光制膜原理与过程	(212)
5.1.1	激光等离子体法制膜的简单机制	(212)
5.1.2	激光制膜过程	(213)
5.1.3	激光辐射与靶材相互作用	(213)
5.1.4	激光等离子体与基片相互作用	(217)
5.2	影响激光制膜的几种因素	(222)
5.2.1	激光波长与运转方式	(222)
5.2.2	激光能量密度	(223)
5.2.3	激光脉冲频率	(224)
5.2.4	辅助气压	(224)
5.2.5	基片温度	(224)
5.3	激光制膜工艺方法与典型实例	(225)
5.3.1	激光物理气相沉积薄膜(LPVD)	(226)

5.3.2	激光化学气相沉积薄膜(LCVD)	(228)
5.4	激光选区定域制膜	(232)
5.4.1	激光定域制膜机制及物理模型	(233)
5.4.2	激光定域制膜工艺与系统	(236)
	参考文献	(239)
第六章	激光在微电子技术中的应用	(242)
6.1	脉冲激光加工在微电子技术中的应用	(242)
6.2	半导体的激光退火	(245)
6.2.1	半导体的脉冲激光退火	(245)
6.2.2	连续激光退火	(250)
6.3	激光微调	(252)
6.3.1	激光微调电阻	(252)
6.3.2	激光微调电容	(256)
6.4	激光修补(修复)集成电路	(257)
6.5	激光光刻	(259)
	参考文献	(260)
第七章	激光加工成套设备系统	(262)
7.1	激光加工机	(262)
7.2	激光加工成套设备	(264)
7.3	激光加工生产线中的检测与监控技术	(270)
	参考文献	(273)
第八章	纳米技术	(274)
8.1	纳米技术的发展和应	(274)
8.1.1	纳米概念的提出	(274)
8.1.2	纳米技术的应用前景	(275)
8.2	激光制备纳米材料与纳米器件	(276)
8.2.1	激光制备纳米粉末	(276)
8.2.2	激光制备纳米薄膜	(281)
	参考文献	(284)

第一章 激光先进制造技术基础

1.1 激光束特性

激光与其他光源相比,具有单色性好、相干性好、方向性好和亮度高等特点。

(1) 单色性好。普通光源发出的光均包含较宽的波长范围,即谱线宽度宽,如太阳光就包含所有可见光波长,而激光为单一波长,谱线宽度极窄,通常在数百纳米至几微米,与普通光源相比,谱线宽度窄了几个数量级。

(2) 相干性好。普通光源发出的光属于非相干光,不产生干涉现象,而激光有很好的相干特性。激光束叠加在一起,其幅度是稳定的,在相当长时间内,可保持光波前后的相位关系不变,这是任何其他的光源所达不到的。

(3) 方向性好。普通光源发射的光射向四方,谈不上有什么方向性,光束发散度大;而激光发散角小,一般为几个毫弧度,方向性也好,如将激光束射向月球,则在月球表面的光斑直径不超过 2km。

(4) 亮度高。所谓亮度,光学上给出的定义是,光源在单位面积上某一方向的单位立体角内发射的光功率。激光束能通过一个光学系统(如透镜)聚焦到一个很小面积上,具有很高的亮度。例如一支输出功率为 1mW 的 He-Ne 激光器输出的激光,经过透镜聚焦后,其亮度比太阳的亮度高 10 万倍^[1]。

在激光谐振腔内,激光场是一个稳定的驻波场,垂直于激光传播方向的光场分布称之为横模,通常讲的光束的质量,主要是看输出光束的横模(TEM_{mn},这里 m, n 分别代表两个正交方向的节点

数)分量,也就是看 m, n 的大小。

对于一台圆柱形的固体激光器或放电管内径为圆形的气体激光器,激光束的横向光场分布函数为

$$E_{mn}(r, \phi) = C_{mn} \left[\frac{\sqrt{2}}{W(z)} r \right]^m \cdot L_n^m \left[\frac{2}{W^2(z)} r^2 \right] \cdot \exp \left[-\frac{r^2}{W^2(z)} \right] \cdot \cos(m\phi) \quad (1.1.1)$$

式中, r 为坐标半径; ϕ 为相位角; C_{mn} 为归一化因子; L_n^m 为关联拉盖尔多项式; $W(z)$ 为距束腰 $W_0(z=0)$ 处光斑的半径。当 m, n 均为零时,即为基模高斯光束,其光强分布为^[2]

$$E_{00}(r, \phi) = A_{00} \cdot \exp \left[-\frac{r^2}{W^2(z)} \right] \quad (1.1.2)$$

1.1.1 激光的相干性

激光束与普通光源相比,具有很好的相干性(包括时间相干性和空间相干性)。

一、时间相干性

图 1.1.1 为迈克耳逊干涉仪的光路图,示出了光束的时间相干性。当光束产生相干时,有一个相干时间 τ_c ,则其光束的纵向相干长度为 $c\tau_c$, c 为光速。以 He-Ne 激光束为例,它的相干时间 τ_c 近似为 10^{-10} s,故其时间相干长度为 30cm ^[3]。对 τ_c ,有

$$\tau_c \sim \frac{1}{\Delta\nu} \quad (\Delta\nu \text{ 为谱线宽度})$$

对于一台激光器, $\Delta\nu$ 近似为 500Hz ,相干时间 τ_c 为 $2 \times 10^{-3}\text{s}$,则激光束的时间相干长度能达

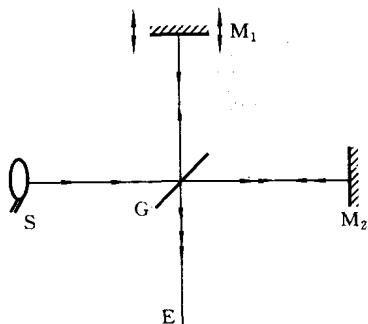


图 1.1.1 迈克耳逊干涉仪光路图
S 为光源, G 为分光器, E 为观察屏, M_1 和 M_2 是两块平面反射镜, M_2 固定不动, M_1 可沿法线方向移动;当两束光会合叠加,就会产生干涉现象,从 E 处便可观察到干涉图样

到 $6 \times 10^7 \text{cm}$; 如果对激光器进行锁模, τ_c 可压缩到 10^{-9}s , 则此时锁模激光束的时间相干长度仅为 $c\tau_c = 3 \times 10^{10} \times 10^{-9} \text{cm} = 30 \text{cm}$ 。

二、空间相干性

如图 1.1.2 所示, $S\tilde{S} = l$, $D \gg d$, 空间相干长度 $l = \frac{\lambda D}{2d}$, λ 为波长。对于由点源伸长的扩展源, 要得到好的相干性, 必须使 $l \ll \frac{\lambda D}{d}$, 即 $d \ll \frac{\lambda D}{l}$ 或 $d \ll \frac{\lambda}{\theta}$ (这里 $\theta \approx \frac{l}{D}$)。

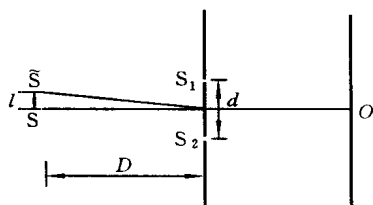


图 1.1.2 杨氏双缝实验光路图
S 为光源, S_1 和 S_2 为两窄缝, D 为 S 至缝 S_1 和 S_2 间的垂直距离, $D \gg d$

从这里看出, 空间相干长度与 θ 有关, 对于普通光源, 为了得到空间相干光, 必须通过针孔; 而激光束具有很好的空间相干性, 图 1.1.3 示出了一台红宝石激光器的空间相干性, 从图中可清楚地看到激光束具有较好的空间相干性。

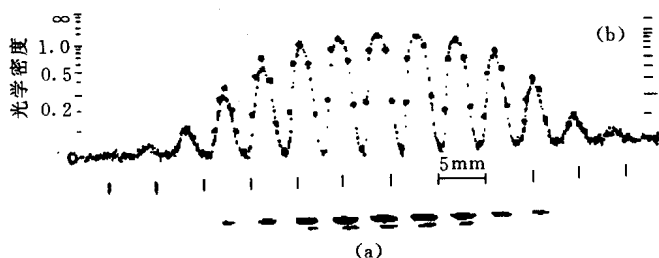


图 1.1.3 红宝石棒横截面双缝实验

(a) 实际干涉图; (b) 干涉图的密度轨迹

缝宽为 0.00075cm , 双缝之间的距离为 0.0054cm , 可通过此双缝实验观察到双缝干涉图。点对应于理论计算值, 假定平面波穿过双缝时

1.1.2 激光束的形状与发散

激光束的空间形状是由激光器的谐振腔决定的, 且在给定边

界条件下,通过解波动方程来决定谐振腔内的电磁场分布,在圆形对称腔中具有简单的横向电磁场的空间形状。

正如前述,腔内的横向电磁场分布称为腔内横模,用 TEM_{mn} 表示(见图 1.1.4 和图 1.1.5), TEM_{00} 表示基模, TEM_{01} 、 TEM_{02}

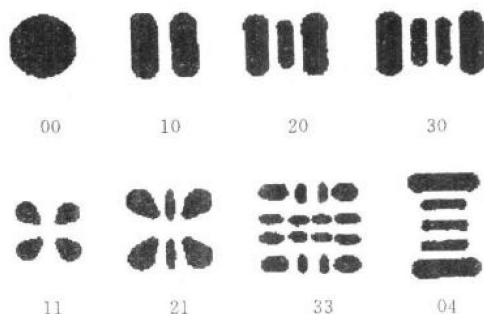


图 1.1.4 矩形对称系统中的横模图

整数表示在每两个互相垂直的方向通过光束模图的零点(暗区)

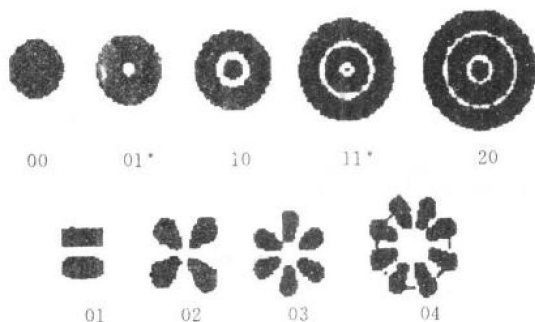


图 1.1.5 圆形对称系统中的横模图

第一位整数表示沿径向穿过光斑的零点(暗区),第二位整数表示沿圆周方向的零点数的一半。用星号表示的模图是两个模相对中心轴旋转 90° 后的线性叠加

和 TEM_{10} 、 TEM_{11}^* 、 TEM_{20} 表示低阶模, TEM_{03} 、 TEM_{04} 和 TEM_{30} 、 TEM_{33} 、 TEM_{21} 等均表示高阶横模。图 1.1.6 示出了激光器的谐

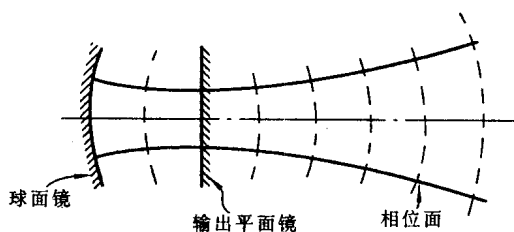


图 1.1.6 激光器的谐振腔

当谐振腔以低阶模振荡时,其输出光束的波前为平面,
如果采用合适谐振腔参数,光束发散较小

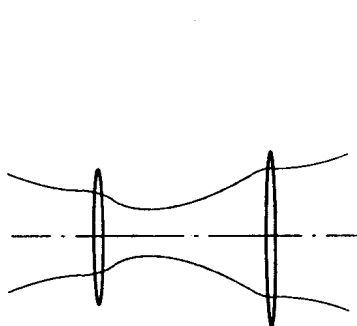


图 1.1.7 高斯光束通过一组凸透镜后其束腰增加

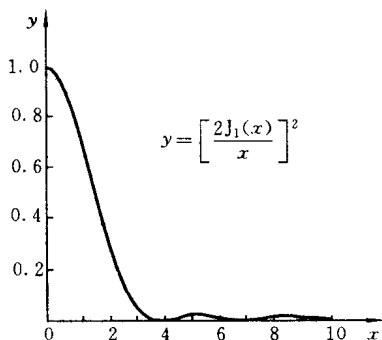


图 1.1.8 基模光束光强按贝塞尔函数曲线分布

振腔,图 1.1.7 示出了高斯光束经透镜后的传播,图 1.1.8 示出了基模高斯光束的光强分布。

根据式(1.1.2)可知,基模高斯光束的光强 $I(r)$ 为

$$I(r) = I_0 \cdot \exp\left(-\frac{2r^2}{W^2}\right)$$

式中, W 为光束半径; r 为径向坐标; I_0 为初始光强。在激光谐振腔内,激光束通常按高斯光束传播,在激光束聚焦后也是如此。

大多数激光器输出均为高阶模。为了得到基模或是低阶模输