



LASER PROCESSING PRINCIPLE AND APPLICATION

激光加工技术

王家金 主编

中国计量出版社

13 1107
117

激光加工技术

王家金 主编

中国计量出版社

9310140

新登(京)字024号

内 容 提 要

本书主要介绍激光加工理论、激光加工工艺等基本知识和数据,重点介绍各种激光加工技术及应用,也介绍了激光器、外光路和加工设备,以及激光加工安全防护的法定知识,全书共分九章:1. 概论;2. 激光加工设备;3. 激光加工的物理基础;4. 金属表面的激光强化;5. 激光焊接;6. 激光切割;7. 半导体材料的激光加工;8. 激光加工的其它应用;9. 激光加工的安全防护。

本书适用于机械制造、材料、焊接、铸工、激光等专业的教材和参考书,也是从事激光科研、机械加工的工程技术人员、工人的必备书,更可供经济建设决策者阅读、参考。

激光加工技术

王家金 主编

责任编辑 王朋植

—*—

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲2号

中国计量出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

—*—

开本 850×1092/32 印张 20.75 字数 545千字
1992年11月第1版 1992年11月第1次印刷

印数 1—760

ISBN 7-5026-0556-8/TN·9 精装

定价 17.00元

〔科技新书目:284—071④〕

前 言

自60年代初发明了第一台红宝石激光器以来，世界上又陆续出现了其它类型的气体和固体激光器，乃至半导体激光器。激光器的发明、发展和完善促进了激光技术的应用。

激光技术应用面很宽，诸如激光加工、激光医疗、激光通讯、激光存贮、激光印刷、激光光谱、激光分离同位素、激光检测和计量等等，都在不同程度上得到了发展。

激光加工意即激光对各种材料的加工。由于热影响区小，光束方向性好，而且能使光束斑点聚焦到波长级，可以进行选择性加工、精密加工，这是激光加工具有的特点和优越性，是机械加工中最有竞争力的一种替代手段。用激光加工对加工行业、产业进行技术改造已势在必行。

激光加工是一门综合技术的应用，涉及光、机、电、材料、计算机等技术。激光加工技术具有自己的特色和规律，形成了激光加工理论和各种激光加工工艺参数。

编写本书的目的在于向广大读者介绍激光加工理论和激光加工工艺等基本知识和数据。同时，为便于用户选用激光器等，也介绍了激光器、外光路及加工设备。

本书适于大专院校的机械制造、材料、焊接、铸工、激光等专业师生阅读，既可以作为参考书，也可作为教材；也是从事激光加工科研的必备书。本书也适于机械加工的工程技术人员、工人参考；更可供经济建设决策者阅读，在作出技术改造的决定以前，不失为一本很好的参考书。

本书由国内长期从事激光加工的专家编写，他们的工作代表了我国激光加工的水平。书中尽可能地汲取了自己的工作经验和

成果，同时也参阅了国外的资料、文献，力求使内容能够紧密地结合生产需要。为此，本书成立了编委会，具体分工如下：

主 编 王家金（前言、第一章及主审）
副主编 张 兵（副主审）
编 委 刘玉泉（第二章部分）
邹至荣、周家瑾、苏宝娣（第三、四、
八章）
黄维玲（第二章、第七章，第五章部
分）
汤祖尧（第五章部分、第六章）
胡志强、李军（第九章）

此外，刘江龙、薛岳参加了第四章的编写工作；谭继福、韩志范参加了第三章的编写工作。

在“八五”激光应用技术攻关中，将激光加工的工艺手册和安全防护列入了规划。规划完成后，必将有统一的、我国自己的工艺数据，以及符合我国实际情况的激光技术安全防护规范，因此本书将来再版时，其内容必将得到充实和完善。

本书在编写过程中，得到国家科委高技术司潘秀苗、孙中发同志的关心和支持，为本书的顺利出版提供了很多方便。此外，长春光机所研究员关振中同志为本书结构设计提供了宝贵意见，在此一并致谢。

由于激光加工技术的应用在我国刚刚起步，系统地进行工艺研究还不够，因此读者因进行工艺研究需要参考本书时，如感不足，尚祈谅解。

编 者 1992. 7

目 录

第一章 概论	(1)
1.1 激光的特性和发展简史	(1)
1.1.1 激光的特性	(1)
1.1.2 激光技术发展简史	(2)
1.2 激光加工的特点、类型和应用	(4)
1.2.1 激光加工的特点	(4)
1.2.2 激光加工的类型和应用	(5)
1.2.3 激光加工系统的基本概念	(6)
1.3 国外激光加工现状及发展预测	(7)
1.4 我国激光加工现状及发展预测	(10)
第二章 激光加工设备	(13)
2.1 气体激光器	(13)
2.1.1 氦-氖激光器	(13)
2.1.2 氩离子激光器	(15)
2.1.3 CO ₂ 激光器	(18)
2.1.4 准分子激光器	(31)
2.2 固体激光器	(33)
2.2.1 引言	(33)
2.2.2 常用的激光工作物质	(35)
2.2.3 泵浦光源	(40)
2.2.4 固体激光器电源	(48)
2.3 激光器的输出特性与测量	(61)
2.3.1 能量与功率	(61)
2.3.2 光束模式与发散角	(63)
2.3.3 尖峰结构及脉宽	(66)
2.3.4 光的偏振	(70)

2.4 激光加工设备的光学系统	(72)
2.4.1 光学系统的功能及选用原则	(72)
2.4.2 光束聚焦	(73)
2.4.3 其它的光学元件	(79)
2.5 加工机及控制系统	(84)
2.5.1 激光加工机的结构形式	(84)
2.5.2 二坐标、三坐标、五坐标加工机和数控系统	(85)
2.5.3 激光机器人	(91)
2.5.4 典型的激光加工系统	(94)
参考文献	(98)
第三章 激光加工的物理基础	(99)
3.1 激光与材料的相互作用	(99)
3.1.1 激光与材料相互作用的物理过程	(101)
3.1.2 吸收率	(111)
3.1.3 激光与固体的相互作用	(116)
3.1.4 激光与液体的相互作用	(126)
3.1.5 激光与气体的相互作用	(128)
3.1.6 激光与等离子体的相互作用	(134)
3.2 材料在激光作用下的传热	(136)
3.2.1 半无限大物体的加热	(137)
3.2.2 有限厚平板的加热	(139)
3.2.3 多层板的加热	(144)
3.2.4 恒定热输入熔化半无限大物体	(146)
3.2.5 汽化半无限大物体	(148)
3.2.6 数值法求解导热问题	(150)
3.3 材料在激光作用下的传质	(156)
3.3.1 激光作用下的固相传质	(157)
3.3.2 激光作用下的液相传质	(159)
3.3.3 激光快速熔凝过程中的溶质再分配	(162)
3.4 激光加工制品的质量检测	(169)
3.4.1 金相检验	(169)
3.4.2 显微硬度分析	(170)

3.4.3 微区成分分析	(171)
3.4.4 X线结构分析	(174)
3.4.5 电镜分析	(175)
3.4.6 表面粗糙度的测定	(176)
3.4.7 机械性能分析	(178)
3.4.8 残余应力分析	(178)
3.4.9 典型激光加工制品的质量分析	(180)
参考文献	(182)
第四章 金属表面的激光强化	(186)
4.1 激光淬火(激光相变硬化)	(186)
4.1.1 激光淬火的基础理论	(186)
4.1.2 激光淬火工艺	(216)
4.2 激光合金化与涂覆	(239)
4.2.1 激光合金化与涂覆的基础理论	(239)
4.2.2 激光合金化与涂覆工艺	(250)
4.2.3 激光合金化与涂覆的质量控制	(274)
4.2.4 常用材料的激光合金化与涂覆	(280)
4.2.5 激光合金化与涂覆的应用实例	(284)
4.3 激光表面非晶化和微晶化	(284)
4.3.1 激光非晶化原理	(285)
4.3.2 脉冲激光表面非晶化	(296)
4.3.3 连续激光表面非晶化	(301)
4.3.4 快速熔凝的凝固理论	(304)
4.3.5 工艺参数对组织结构的影响	(315)
4.4 冲击硬化及激光对材料的破坏	(319)
4.4.1 冲击硬化的基本原理	(319)
4.4.2 冲击硬化工艺参数对材料机械性能的影响	(320)
4.4.3 冲击硬化的应用	(326)
4.4.4 激波及其引起断裂的能力	(326)
参考文献	(330)
第五章 激光焊接	(335)
5.1 热传导焊接	(335)

5.1.1	激光焊接热传导理论简述	(335)
5.1.2	激光焊接工艺参数的选择	(340)
5.1.3	焊接工艺方法的选择	(352)
5.1.4	激光钎焊	(361)
5.1.5	热传导型激光焊接的应用	(370)
5.2	激光深熔焊	(382)
5.2.1	激光深熔焊理论基础	(382)
5.2.2	激光深熔焊特征	(390)
5.2.3	激光深熔焊影响因素	(394)
5.2.4	激光深熔焊接头形式	(408)
5.2.5	典型材料的激光深熔焊	(409)
5.3	激光焊接的发展	(421)
5.3.1	增弧激光焊	(421)
5.3.2	激光增丝焊	(424)
	参考文献	(425)
第六章	激光切割	(428)
6.1	激光切割的特征和基本原理	(428)
6.1.1	激光切割的特征	(428)
6.1.2	激光切割的基本原理	(429)
6.2	激光切割的质量及影响因素	(434)
6.2.1	激光切割质量	(434)
6.2.2	激光切割质量的影响因素	(435)
6.3	典型材料的激光切割	(468)
6.3.1	金属材料的切割	(468)
6.3.2	非金属材料的切割	(479)
6.3.3	复合材料的切割	(487)
6.3.4	其它特种材料的切割	(487)
6.4	激光切割发展方向	(489)
6.4.1	增加总能量输入	(489)
6.4.2	增加功率密度	(491)
6.4.3	提高熔融产物的排出速度	(491)
6.4.4	增弧切割	(496)

参考文献.....	(498)
第七章 半导体材料的激光加工	(501)
7.1 概述	(501)
7.2 激光与半导体相互作用	(502)
7.2.1 吸收	(502)
7.2.2 反射	(505)
7.2.3 热传导	(506)
7.3 加工模式.....	(507)
7.3.1 热模式	(507)
7.3.2 等离子体模式	(509)
7.4 半导体材料激光加工方法.....	(509)
7.4.1 连续激光加工	(509)
7.4.2 脉冲激光加工	(511)
7.5 激光加工半导体材料的应用.....	(513)
7.5.1 已在生产中应用的加工工艺	(513)
7.5.2 应用展望	(529)
参考文献.....	(544)
第八章 激光加工的其它应用	(547)
8.1 激光化学气相沉积 (LCVD)	(547)
8.1.1 LCVD 的基础及工艺.....	(547)
8.1.2 LCVD 的应用.....	(562)
8.2 激光制备超微粒	(563)
8.2.1 超微粒的结构特征	(563)
8.2.2 超微粒的性质和应用	(566)
8.2.3 激光制备超微粒方法	(567)
8.3 激光加热改善切削加工性.....	(572)
8.4 电-激光加工	(577)
参考文献	(580)
第九章 激光加工的安全防护	(583)
9.1 激光辐射的危害.....	(584)
9.1.1 激光损伤组织的因素	(584)
9.1.2 激光对眼睛的危害	(586)

9.1.3 激光对皮肤的危害	(588)
9.2 使用激光时伴随的危害	(589)
9.2.1 电气危害	(590)
9.2.2 大气污染	(591)
9.2.3 伴随辐射危害	(591)
9.2.4 低温致冷剂	(591)
9.2.5 噪声	(592)
9.2.6 爆炸危害	(592)
9.2.7 火灾	(592)
9.3 激光安全防护标准	(593)
9.3.1 国际激光安全防护标准	(593)
9.3.2 外国激光安全防护标准	(594)
9.3.3 我国激光安全防护标准	(596)
9.4 激光危害分类	(597)
9.4.1 决定激光器危害分类的因素	(598)
9.4.2 可达发射极限和激光危害分类	(599)
9.4.3 激光加工系统危害分类举例	(603)
9.4.4 其它危害因素分析	(605)
9.5 激光加工系统的安全防护措施	(607)
9.5.1 激光加工系统的工程控制	(610)
9.5.2 警告标记	(620)
9.5.3 其它说明性要求	(622)
9.5.4 个人防护用品	(622)
9.6 典型的激光加工系统的安全防护措施	(630)
9.6.1 Nd:YAG 激光材料加工	(631)
9.6.2 高功率CO ₂ 激光(1~20kW)加工设备	(635)
9.6.3 激光在印刷工业中的应用	(638)
9.6.4 其它损伤(噪声、空气污染)	(639)
9.6.5 准分子激光加工	(640)
9.7 激光安全管理	(640)
9.7.1 激光安全委员会	(641)
9.7.2 激光安全员	(642)

9.7.3 激光加工主管人员	(644)
9.7.4 激光加工工作人员	(645)
9.7.5 激光安全训练	(645)
9.7.6 医学监督	(646)
参考文献	(648)

第一章 概 论

自1960年发明第一台激光器以来，人们对激光的特性进行了研究，并论证了激光的应用前景。在1964~1965年相继发明了CO₂、YAG激光器后，才进一步证实了激光加工材料的可行性，这是因为这两种激光器可以产生高的平均功率和峰值功率。

经过物理学家对激光特性和激光束与物质相互作用机理的研究，激光技术的应用领域才不断明确和具体化。

1.1 激光的特性和发展简史

1.1.1 激光的特性

激光的应用领域根据激光的特性而确定。激光有四大特性：单色性、相干性、方向性和高能量密度。

激光器所发出的激光具有其它光源的光所难以达到的、极高的单色性，这是由于构成激光的谐振腔的反射镜具有波长选择性，并且利用原子固有能级跃迁的结果。激光是受激发射的，它的频率宽度很窄，比普通光源（如氩灯）的频率宽度要窄几个数量级。因此，激光单色性比普通光源单色性要好得多。

相干性是区别激光与普通光源的重要特性。当两列振动方向相同、频率相同、相位固定的单色波迭加后，光的强度在迭加区域不是均匀分布的，而是在一些地方有极大值，一些地方有极小值。这种在迭加区域出现的强度稳定的强弱分布的现象称为光的干涉现象，即这两列光波具有相干性。在普通光源中，各发光中心是自发辐射，彼此相互独立，基本上没有相位关系，因此很难

有恒定的相位差，相干性很差；而激光是受激辐射占优势，加上谐振腔的作用，各发光中心是相互密切联系的，在较长时间内有恒定的相位差，能形成稳定的干涉条纹，所以激光的相干性好。

激光束的方向性好亦即光线的发散度小，是因为从谐振腔发出的只能是反射镜多次反射后无法显著偏离谐振腔轴线的光波。由于不同激光器的工作物质类型和均匀性、光腔类型和腔长、激励方式以及激光器的工作状态不同，其方向性也不同。一般气体激光器由于工作物质有良好均匀性，并且腔长一般较大，所以有最好的方向性，发散角可以达到 10^{-3} rad；固体激光器方向性较差，发散角一般在 10^{-2} rad 量级。当然，通过外光路系统的改进（如加望远镜系统），也可以改善其方向性。

激光束的空间相干性和方向性对它的聚焦性能有重要影响。

激光束也和其它光束一样，可以通过凸镜或金属反射镜加以聚焦。经聚焦后，可以将激光的巨大能量聚焦到直径为光波波长量级的光斑上，形成极高的能量密度，例如可产生 $10^5 \sim 10^{13} \text{ W/cm}^2$ 的功率密度（辐照度）。

主要的特性就是激光可以聚焦产生巨大的功率密度，而使激光加工成为可能。

1.1.2 激光技术发展简史

1960年，梅曼 (T.Maiman) 在量子电子学发展的成果基础上发明了第一台红宝石激光器；1961年，德若凡 (А.Джавин) 发明第一台气体激光器——氦氖激光器；在1962年又出现了半导体激光器。1964年，帕特尔 (C.Patel) 发明了第一台 CO_2 激光器；1965年，贝尔实验室又发明了第一台 YAG 激光器。1968年开始发展高功率 CO_2 激光器；1974年出现了第一台商用 1 kW CO_2 激光器。以后的激光器的发展非常迅速，各种实用化的 YAG

激光器和 CO₂ 激光器不断出现。

由于激光束与物质的相互作用研究的发展，以及激光器的输出功率的提高并变成了商品，使激光器走出了实验室变成了工业中加工材料的设备。

激光加工用于工业生产的前提首先要有可靠的、稳定的、光束能量可调的、光束模式合适的激光器。在 70 年代初，YAG 激光器由于晶体材料的质量不断提高、激励方式的改进、灯泵质量的不断提高、光腔的改进、冷却系统的完善，已开始作为微型件切割、焊接的重要光源，并逐步在生产中得到应用，如电子工业中的各种焊接、切割、退火、钟表行业中的打孔等。特别是到了 70 年代后期，由于激光器的稳定性、可靠性大大提高了，又由于在微型件加工中对激光束与物质相互作用的深入了解，并对各种材料的加工工艺参数的探索和取得的成就，已在电子工业、钟表工业中出现了正规的激光加工工艺。特别是集成电路的发展，要求采用激光加工工艺，诸如激光微调电阻就应运而生了。到了 80 年代，激光微调更成为非采用不可的技术，仅美国 ESI 公司的产量就已超过 500 台，在全世界正在使用的激光微调机已达数千台。近几年来，激光焊接用于显像管的零、部件更成为提高显像管质量和成品率的主要手段，一些主要生产厂家不惜投入大量资金用于开发这种产品。

CO₂ 激光器开始为封离式、玻璃管结构，其功率也从几十瓦到几百瓦，乃至上千瓦。因此，在工业材料加工中也得到了应用，如钢板的切割和焊接、各种易损件的表面强化等。但是，其结构不够坚固，同时，输出功率要提高也有一定难度。出于工业需要，在 70 年代出现了功率达数千瓦的横向流动式 CO₂ 激光器，其可靠性、稳定性均满足了工业生产线的需要。在 1970~1980 年间，各个国家对焊接、切割、热处理的规律进行了研究，对钢板的切割、石英管的切割、铝材的切割、汽车零件的热处理、钢板的焊接、不同金属的焊接等都取得了系统的试验数据，为在工厂建立激光加工生产线积累了有益的试验数据。

在 80 年代，激光器质量又有了提高，这反映在自动化程度和检测、控制功能都显著提高了。其输出功率： CO_2 激光器由几千瓦发展到上万瓦；YAG 激光器也由几百瓦发展到千瓦级。这些激光器也做到了连续运行和脉冲运行两种方式；激光的模式也从多模输出发展到基模或接近基模输出；激光束的发散角也做到几个毫弧度。这样就更进一步推动了激光的应用。迄今为止，在不少汽车厂都建立了激光加工生产线。

由于激光切割和焊接有较大的市场，适用于切割、焊接的纵流快速 CO_2 激光器又应运而生。到了 80 年代后期，已有了模式好的 1~5 kW 的快速纵流 CO_2 激光器，也许这是 CO_2 激光器的主要发展方向。

为了减小体积、提高转换效率， CO_2 激光器的激励方式由直流激励发展成高频激励、微波激励，其优越性是很明显的。现在已出售的商品 CO_2 激光器，大多数采用高频激励。特别是激光系统与机器人、CAM 结合起来构成激光柔性加工系统，使激光加工设备更灵活、更有竞争力。

近年来，由于准分子激光器的发展，又有了新的激光加工系统。准分子激光器的光束属于紫外波段，其加工机理有别于 YAG、 CO_2 激光。它主要是激光化学反应，或称为冷加工；而 YAG、 CO_2 激光加工则属于热效应，或称为热加工。准分子激光加工是极有前途的，但如何提高准分子激光器的寿命尚属一大难题；如何提高准分子激光输出功率和改善其输出的光束质量也是要解决的课题，其作用机理也待进一步探索。

1.2 激光加工的特点、类型和应用

1.2.1 激光加工的特点

激光加工就是将激光束照射到加工物体的表面，用以去除或熔化材料以及改变物体表面性能从而达到加工的目的，因此属于

无接触加工。其主要特点也就是无惰性，因此其加工速度快、无噪声。由于光束的能量和光束的移动速度都是可以调节的，因此可以实现各种加工的目的。

由于光束照射到物体的表面是局部的，虽然加工部位的热量很大、温度很高，但移动速度快，对非照射的部位没有什么影响。因此，其热影响区很小。例如，在热处理、切割、焊接过程中，加工工件基本无变形。这一特点也可以成功地用于局部热处理和显像管的焊接。

激光加工不受电磁干扰。与电子束加工相比，其优越性就在于可以在大气中进行。在大工件加工中，使用激光加工比使用电子束加工要方便得多。

激光束易于导向、聚焦和发散。根据加工要求，可以得到不同的光斑尺寸和功率密度。通过外光路系统可以使光束改变方向，因而可以与数控机床、机器人连接起来，构成各种加工系统。这是一种极灵活的加工系统，对于改造传统的机床和机器人是一种极好的方法。

激光束不仅可以聚焦，而且可以聚焦到波长级光斑，这就很小了。因此，用这样小的高能量光斑可以进行微区加工，也可以进行选择性加工。

1.2.2 激光加工的类型和应用

激光加工系指激光束作用于物体的表面而引起的物体的变形，或物体的性能的改变的加工过程。按光与物质相互作用机理，大体可将激光加工分为激光热加工和光化学反应加工两类。

激光热加工系指激光束加于物体所引起的快速热效应的各种加工过程；激光光化学反应加工系指激光束加于物体，借助高密度高能光子引发或控制光化学反应的各种加工过程，也称为冷加工。