




曹凤国 主编

# 激光加工 技术

JIGUANG JIAGONG  
JISHU

 北京科学技术出版社

# 激光加工技术

曹凤国 主编

北京科学技术出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

激光加工技术/曹凤国主编.-北京:北京科学技术出版社,2007.1  
ISBN 978-7-5304-3438-3

I. 激… II. 曹… III. 激光加工 IV. TG665

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第127819号

### 激光加工技术

---

主 编:曹凤国

责任编辑:吴 建

封面设计:黄金支点

出 版 人:张敬德

出版发行:北京科学技术出版社

社 址:北京西直门南大街16号

邮政编码:100035

电话传真:0086-10-66161951(总编室)

0086-10-66113227 0086-10-66161952(发行部)

电子信箱:bjkjpress@163.com

网 址:www.bkjpress.com

经 销:新华书店

印 刷:三河国新印装有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

字 数:442 千

印 张:17.25

版 次:2007年1月第1版

印 次:2007年1月第1次印刷

ISBN 978-7-5304-3438-3/T·561

---

定 价:36.00 元



京科版图书,版权所有,侵权必究。

京科版图书,印装差错,负责退换。

# 《激光加工技术》编委会

主 编 曹凤国

副主编 刘敬明 伏金娟

编 委 曹凤国 刘敬明 伏金娟 黄建宇

吴康体 孙连珍

# 前 言

中国现代制造技术正在空前迅猛地发展，为中国经济的腾飞发挥着越来越重要的作用。众所周知，任何材料不经过加工是不能被人类所应用的。今天人们依托先进的加工技术，以前所未有的速度更新现有产品，创造新的产品，从而极大地丰富了人类社会的物质生活，有力地推动了科学技术的整体发展，加快了人类认识自我和外部世界的进程。人类社会能够创造今天辉煌的经济成就，能够享受现代化生活方式，能够探索宇宙，登上月球，从根本上讲是得益于加工制造技术的迅猛发展。

加工技术的日新月异，特别是加工方法的不断创新和发展，推动了人类的历次工业革命。激光加工技术作为现代加工制造技术最重要的方法之一，近年来得到迅速发展。激光加工技术是利用激光束与物质相互作用的特性，将能量聚焦到微小的空间，利用这一高密度的能量，对材料（包括金属与非金属）进行切割、打孔、焊接、表面处理、快速成形、微细加工等的一种新加工技术，这是一种摆脱传统加工理念的全新的加工、热处理方法。激光被誉为“万能加工工具”，“未来制造系统的共同加工手段”，不仅在国防、军事领域，而且在民用工业也得到极其广泛的应用。

本书主要介绍了激光加工的基本原理，系统阐述了激光各种加工工艺、设备和应用、发展等。特别值得一提的是，本书将激光加工从材料的去除加工（如切割、打孔等）、增长加工（如焊接、快速成形等）、表面加工（如改性、淬火等）、精密微细加工（如 LIGA 加工、准分子激光加工等）、激光复合加工（如激光与电火花复合加工等）这一全新的视角进行阐述，并通过大量的应用实例和工业应用数据图表，总结了国内外激光加工的最新技术成果，为未来激光

加工技术的研究和发展指出了方向。

本书主要由北京市电加工研究所曹凤国、刘敬明、伏金娟、黄建宇、吴康体、孙连珍等编著，由曹凤国教授任主编，刘敬明博士、伏金娟高工任副主编。

本书在编写过程中，得到徐性初院士，王乃彦院士、钟群鹏院士的关心与指导，在此表示衷心感谢。特别感谢本书参考文献中所列的作者，他们的著作和论文为本书的编写提供了帮助。

由于编者水平有限和技术的迅速发展，书中难免存在缺点和错误，敬请广大读者批评与指正。

编者

2006年3月29日

# 目 录

## 第1章 绪 论

1.1 激光和工业激光器的发展 .....	1
1.2 激光加工的特点、类型及应用 .....	2
1.2.1 激光加工的特点 .....	3
1.2.2 激光加工的类型及应用 .....	3
1.3 先进激光加工技术的发展方向 .....	4
1.4 激光加工技术术语及符号、单位 .....	6
1.4.1 术语 .....	6
1.4.2 符号和单位 .....	9

## 第2章 激光材料加工理论

2.1 激光产生的基本原理 .....	10
2.1.1 光子的基本性质 .....	10
2.1.2 光子的相干性 .....	10
2.1.3 光子简并度 .....	11
2.1.4 光的受激辐射 .....	11
2.1.5 光的受激辐射放大 .....	14
2.1.6 光的自激振荡 .....	15
2.1.7 激光模式 .....	16
2.2 激光的特性 .....	17
2.2.1 激光的方向性 .....	17
2.2.2 激光的单色性 .....	17
2.2.3 激光的高强度(相干光强) .....	17
2.2.4 激光的相干性 .....	18
2.3 激光与材料的相互作用 .....	19
2.3.1 材料在激光作用下的过程 .....	19
2.3.2 材料的吸收与反射特性 .....	20
2.4 材料在激光作用下的热力效应与组织效应 .....	23
2.4.1 热力效应 .....	23

2.4.2 组织效应.....	24
-----------------	----

### 第3章 激光器系统

3.1 固体激光器.....	25
3.1.1 固体激光器的基本结构.....	25
3.1.2 用于热加工的固体激光器.....	28
3.2 气体激光器.....	30
3.2.1 高功率 CO <sub>2</sub> 激光器.....	30
3.2.2 准分子激光器.....	33
3.2.3 其他气体激光器.....	34
3.3 其他类型激光器.....	35
3.3.1 化学激光器.....	35
3.3.2 高功率 CO 激光器.....	35
3.3.3 染料激光器.....	35
3.3.4 光纤激光器.....	36
3.3.5 半导体激光器.....	36

### 第4章 激光去除加工

4.1 激光打孔.....	38
4.1.1 激光打孔的原理及特点.....	38
4.1.2 激光打孔的分类.....	41
4.1.3 激光打孔的加工系统.....	43
4.1.4 激光打孔工艺.....	46
4.1.5 典型材料的激光打孔.....	52
4.2 激光切割.....	64
4.2.1 激光切割的特点.....	64
4.2.2 激光切割方式.....	65
4.2.3 影响切割质量的因素.....	67
4.2.4 常用工程材料的激光切割.....	76
4.3 激光打标、雕刻.....	80
4.3.1 激光打标.....	80
4.3.2 激光雕刻.....	83

### 第5章 激光焊接技术

5.1 概述.....	85
5.2 激光热传导焊接.....	85
5.2.1 激光热传导焊接基本原理.....	85



5.2.2	激光焊接工艺参数与焊接方法	85
5.3	激光深熔焊	92
5.3.1	深熔焊理论	92
5.3.2	深熔焊的主要影响因素	92
5.3.3	深熔焊的接头形式与质量	94
5.3.4	常用材料的激光焊接	94
5.3.5	人造金刚石工具的激光焊接	97
5.3.6	激光焊接塑料	100
5.4	激光焊接的应用及设备	103
5.4.1	激光焊接的应用	103
5.4.2	激光焊接设备	104
5.5	激光焊接的优缺点	106
5.5.1	激光焊接的优缺点	106
5.5.2	激光焊接存在的局限性	107

## 第 6 章 激光表面改性技术

6.1	激光表面改性的特点与分类	108
6.1.1	激光表面改性的特点	108
6.1.2	激光表面改性的分类	109
6.2	激光相变强化和激光熔凝强化	110
6.2.1	激光相变强化	110
6.2.2	激光熔凝强化	113
6.2.3	激光表面强化中碳及合金元素的影响	114
6.2.4	激光表面强化工艺	115
6.2.5	激光表面强化实例	118
6.3	激光表面熔覆及合金化	119
6.3.1	激光表面熔覆	120
6.3.2	激光合金化	127
6.3.3	激光表面熔覆与合金化的应用	129
6.4	激光表面非晶化	131
6.4.1	非晶态金属的结构、性质	131
6.4.2	激光非晶化特点	132
6.4.3	激光非晶化原理	133
6.4.4	激光非晶化工艺及影响因素	134
6.4.5	激光非晶化的应用	135
6.5	激光冲击硬化	135
6.5.1	激光冲击硬化的特点	136
6.5.2	激光冲击处理的模型	136
6.5.3	激光冲击硬化对材料机械性能的影响	137

6.5.4 激光冲击处理的发展 .....	139
6.6 复合表面改性技术 .....	140
6.6.1 两种复合表面改性技术 .....	140
6.6.2 两种以上复合表面改性技术 .....	141

## 第 7 章 激光快速成形技术

7.1 概述 .....	142
7.2 快速成形技术的基本原理及特征 .....	142
7.2.1 快速成形技术的原理 .....	142
7.2.2 快速成形技术的工艺过程 .....	143
7.2.3 快速成形技术的特征 .....	143
7.3 快速成形主要的工艺方法 .....	144
7.3.1 液态光敏树脂选择性固化 .....	144
7.3.2 粉末材料选择性激光烧结 .....	146
7.3.3 熔融沉积成形 .....	147
7.3.4 薄型材料选择性切割 .....	148
7.3.5 固基光敏液相法 .....	149
7.3.6 三维打印 .....	149
7.3.7 复合成形法 .....	150
7.4 快速成形的软件与设备 .....	151
7.4.1 激光快速成形前期数据处理 .....	151
7.4.2 激光快速成形设备 .....	154
7.5 快速成形用材料 .....	155
7.5.1 快速成形工艺对材料的要求 .....	156
7.5.2 快速成形材料的分类 .....	156
7.6 激光烧结快速成形 .....	160
7.6.1 激光烧结快速成形机理 .....	160
7.6.2 金属粉末的激光烧结快速成形 .....	160
7.6.3 激光烧结快速成形工艺因素 .....	161
7.7 反求工程与快速成形集成技术 .....	168
7.7.1 反求工程 .....	168
7.7.2 数据获取方法 .....	169
7.7.3 数据处理 .....	171
7.7.4 三维重构 .....	172
7.8 快速模具制造技术 .....	172
7.8.1 快速模具制造技术及其分类 .....	173
7.8.2 快速金属模具制造技术 .....	177
7.8.3 快速模具制造技术的发展方向 .....	184

## 第8章 其他激光加工技术

8.1 激光清洗技术 .....	187
8.1.1 激光清洗基础 .....	187
8.1.2 激光清洗特点和分类 .....	189
8.1.3 激光清洗用激光器 .....	190
8.1.4 激光清洗的应用 .....	191
8.1.5 激光清洗技术的发展 .....	192
8.2 激光复合加工技术 .....	194
8.2.1 激光辅助车削技术 .....	194
8.2.2 激光与步冲复合技术 .....	195
8.2.3 激光与水射流复合切割技术 .....	195
8.2.4 激光复合焊接技术 .....	197
8.2.5 激光与电火花复合加工技术 .....	200
8.2.6 激光与机器人复合加工技术 .....	201
8.3 激光光存技术 .....	202
8.3.1 激光光存技术的发展 .....	202
8.3.2 激光光盘使用的激光器 .....	203
8.4 激光抛光技术 .....	206
8.4.1 激光抛光的特点 .....	206
8.4.2 激光抛光的原理 .....	207
8.4.3 激光抛光系统的主要构成 .....	208
8.4.4 影响激光抛光的工艺因素 .....	208
8.4.5 激光抛光技术的发展和前景 .....	210

## 第9章 激光精密微细加工

9.1 准分子激光微细加工 .....	213
9.1.1 准分子激光加工的原理及特点 .....	213
9.1.2 准分子激光的微细加工 .....	214
9.1.3 准分子激光微细加工的应用 .....	217
9.2 超短脉冲激光的微细加工 .....	220
9.2.1 超短脉冲激光的发展 .....	221
9.2.2 飞秒激光器的分类 .....	222
9.2.3 飞秒激光加工的原理及特征 .....	223
9.2.4 飞秒脉冲激光精细加工的应用 .....	226
9.3 激光微型机械加工 .....	232
9.3.1 微型机械加工 .....	232
9.3.2 准分子激光直写微细加工 .....	233

9.3.3	激光 LIGA 技术 .....	234
9.3.4	激光化学加工技术 .....	237
9.3.5	微型机电系统的激光辅助操控与装配 .....	237
9.4	激光诱导原子加工技术 .....	238
9.4.1	原子层外延生长 .....	239
9.4.2	原子层刻蚀 .....	240
9.4.3	原子层掺杂 .....	240
9.5	激光制备纳米材料 .....	241
9.5.1	激光制备纳米材料的特点 .....	241
9.5.2	激光诱导化学气相沉积法 .....	241
9.5.3	激光烧蚀法 .....	244
9.6	脉冲激光沉积薄膜技术 .....	245
9.6.1	脉冲激光沉积薄膜技术的特点 .....	245
9.6.2	脉冲激光沉积薄膜的原理 .....	246
9.6.3	PLD 沉积薄膜的装置 .....	247
9.6.4	PLD 沉积工艺 .....	248
9.6.5	PLD 制备新材料应用 .....	248
9.6.6	脉冲激光沉积薄膜技术的发展方向 .....	249
9.7	激光-扫描电子探针技术 .....	251
9.7.1	激光-扫描电子探针技术的基本原理 .....	251
9.7.2	纳米加工的应用 .....	252
9.7.3	激光-扫描电子探针技术的发展 .....	253

## 第 10 章 激光加工中的安全防护及标准

10.1	激光的危险性 .....	255
10.1.1	光的危害 .....	255
10.1.2	非光的危害 .....	257
10.2	激光危险性的分类 .....	257
10.2.1	分类过程 .....	257
10.2.2	分级 .....	257
10.3	激光防护 .....	258
10.3.1	激光防护的主要技术指标 .....	258
10.3.2	激光防护的通用操作规则 .....	259
10.4	激光安全标准 .....	259
10.4.1	激光安全的国家标准 .....	259
10.4.2	激光防护镜标准 .....	260

# 第1章 绪 论

自从20世纪50年代世界上第一台激光器诞生以来,科研工作者对激光进行了多方面的研究和应用。1964~1965年相继发明了 $\text{CO}_2$ 、YAG激光器,并经过对激光的特性和激光束与物质相互作用机理的深入研究,激光技术的应用领域开始不断明确和具体化。

40多年来,激光技术与应用发展迅猛,已与多个学科相结合形成多个应用技术领域,如激光加工技术、激光检测与计量技术、激光化学、激光医疗、激光制导等等。这些交叉技术与新的学科的出现,极大地推动了传统产业和新兴产业的发展,同时赋予激光加工技术更广泛的应用领域。

## 1.1 激光和工业激光器的发展

1917年,爱因斯坦在量子理论的基础上提出:在物质与辐射场的相互作用中,构成物质的原子或分子可以在光子的激励下产生光子的受激发射或吸收。这表明如果能使组成物质的原子(或分子)数目按能级的热平衡(玻耳兹曼)分布出现反转,就有可能利用受激发射实现光放大(light amplification by stimulated emission of radiation, LASER),这就是激光的名称。后来理论物理学家发现了受激发射光子(波)和激励光子(波)具有相同的频率、方向、相位和偏振。这些都为激光的出现(一种光波振荡器)奠定了理论基础。到1960年,当时美国休斯公司实验室的梅曼(Theodore H. Maiman)在量子电子学发展成果的基础上发明了世界第一台红宝石固态激光器(ruby laser);1961年,德若凡发明了第一台气体激光器——氦氖激光器;在1962年又出现了半导体激光器,1963年,帕特尔(C. Patel)发明了第一台 $\text{CO}_2$ 激光器;1965年,贝尔实验室发明了第一台YAG激光器;1968年开始发展高功率 $\text{CO}_2$ 激光器,1971年出现了第一台商用1kW $\text{CO}_2$ 激光器。1980年200W准分子Kr激光器问世;1988年出现倍频泵浦YAG激光器。在这之后,激光器的发展非常迅速,各种实用化的固体、气体、半导体、染料和准分子激光器不断出现和完善。

随着激光束与材料的相互作用研究的发展,激光器的输出功率、稳定性和可靠性等的提高使其逐渐得到了实际应用,并且成为工业生产中材料加工的重要分支。自从第一台激光器诞生以来,人们就开始探索激光在材料加工领域中的应用。1965年前后,YAG激光器和 $\text{CO}_2$ 激光器相继出现,由于这两种激光器可以产生相当高的输出功率和能量,使得激光在材料加工领域的应用成为可能。在20世纪70年代初期,随着晶体材料质量的不断提高,激光腔性能的改进,冷却系统和激光谐振腔结构的不断完善,使得YAG激光器开始成为微型件切割、焊接、退火等的重要光源,并逐步在生产中得到应用。到70年代的后期, $\text{CO}_2$ 激光器的结构从封离式、玻璃管结构发展到横向、纵向流动式和波导式;同时激励方式从直流、交流发展到射频,输出功率发展到数千瓦。 $\text{CO}_2$ 激光器的可靠性、稳定性完全满足工业生产线的需要,开始被广泛应用于各种材料的焊接、切割和热处理中。

到了20世纪80年代,激光器的性能和质量有了进一步的发展,自动化程度和检测、控制功能得到了明显的提高。为了提高 $\text{CO}_2$ 激光器的功率,采用快速轴流的结构,输出功率

已达几千瓦甚至上万瓦；为了减小体积，提高效率及激光器的可调制性，激励方式由直流激励发展成高频激励、微波激励。对于 YAG 激光器，同样为了提高激光器的功率和光束质量，必须克服其在高功率运转时出现的严重热透镜效应，在激光器结构上发展了板条、管状等新型结构形式。在此基础上，为了进一步提高激光器的输出功率，多级放大结构被广泛采用。目前单棒结构的最大输出功率只能达到 500W，而多级放大结构可使激光器的输出功率达到几千瓦。这些激光器既可连续运行，又可脉冲运行，还可使用光纤传输；激光的模式也从多模输出发展到基模或接近基模输出；激光的发射角已达到了几个毫弧度。以上这些激光器都已成功地应用于激光表面处理、激光切割及焊接等材料加工领域。

近几年来，随着激光技术的发展，一些新型的激光器相继进入激光加工领域，如半导体激光器、染料激光器、气体原子和分子激光器等，其中最重要的是准分子 (XeCl、KrF) 激光器。准分子激光器的光束属于紫外波段，它与材料作用机理是以激光化学反应为主，其作用过程主要靠高能量密度光子引发或控制化学反应，一般称其为冷加工；而对于 YAG 激光器和 CO<sub>2</sub> 激光器主要以激光的热作用对材料进行加工，称其为热加工。准分子激光加工是极具前途的加工技术，目前已成为研究和发展的焦点领域，在材料加工特别是微细加工领域已得到广泛应用。

1957 年，王大珩等在长春建立了我国第一个光学专业研究所——中国科学院（长春）光学精密仪器机械研究所（简称“光机所”）。1961 年夏，我国第一台红宝石激光器在中国科学院光机所诞生，在此之后，各种类型的固体、气体、半导体和化学激光器相继研制成功。表 1-1 列出了我国研制成功的第一台各类激光器。

表 1-1 我国“第一台”各类激光器

名 称	研制成功时间	研 制 人
HeNe 激光器	1963 年 7 月	邓锡铭等
掺铈玻璃激光器	1963 年 6 月	干福慈等
GaAs 同质结半导体激光器	1963 年 12 月	王守武等
脉冲 Ar <sup>+</sup> 激光器	1964 年 10 月	万重怡等
CO <sub>2</sub> 分子激光器	1965 年 9 月	王润文等
CH <sub>3I</sub> 化学激光器	1966 年 3 月	邓锡铭等
YAG 激光器	1966 年 7 月	胡乾华等

作为具有高亮度、高方向性、高质量等优异特性的新光源，激光应用于许多技术领域，显示出强大的生命力和竞争力。在通信领域，1964 年 9 月用激光演示传送电视图像，1964 年 11 月实现 3~30km 的通话。工业方面，1965 年 5 月激光打孔机成功地用于拉丝模打孔生产，获得显著经济效益。在医学领域，1965 年 6 月激光视网膜焊接器进行了动物的临床实验。在国防领域，1965 年 12 月研制成功激光漫反射测距机（精度为 10m/10km），1966 年 4 月研制出遥控脉冲激光多普勒测速仪。但直到 20 世纪 80 年代，激光器和激光应用仪器才真正走向市场。

## 1.2 激光加工的特点、类型及应用

激光加工技术是利用激光束与物质相互作用的特性对材料进行切割、焊接、表面处理、



打孔、增材加工及微加工等的一门加工技术。激光加工技术是涉及光、机电、材料及检测等多门学科的一门综合技术，它的研究范围一般可分为激光加工系统和激光加工工艺。

### 1.2.1 激光加工的特点

激光加工技术是 20 世纪与原子能、半导体及计算机技术齐名的四大发明之一。激光的应用已渗透到工业、军事、通讯等各个领域，21 世纪被誉为“光加工时代”。1985~1995 年，国外激光产业以 10% 的速度增长，1998 年销售额达到 970 亿德国马克，到 2010 年以激光技术为基础的光电产业将形成 5 万亿美元的产业规模。激光加工、激光通讯及激光医疗成为激光技术应用最重要的三个方面。

激光加工与其他加工技术相比有其独特的特点和优势，它的主要特点如下。

(1) 非接触加工。激光属于非接触加工，切割不用刀具，切边无机械应力，也无刀具磨损和替换、拆装问题，为此可缩短加工时间；激光焊接无需电极和填充材料，再加上深熔焊接产生的纯化效应，使得焊缝杂质含量低，纯度高。聚焦激光束具有  $10^6 \sim 10^{12} \text{ W/cm}^2$  高功率密度，可以进行高速焊接和高速切割。利用光的无惯性，在高速焊接或切割中可急停和快速启动。

(2) 对加工材料的热影响区小。激光束照射到物体的表面是局部区域，虽然在加工部位的温度较高，产生的热量很大，但加工时的移动速度很快，其热影响的区域很小，对非照射的部位几乎没有影响。在实际热处理、切割、焊接过程中，加工工件基本上不产生变形。正是激光加工的这一特点，使其被成功地应用于局部热处理和显微管焊接中。

(3) 加工的灵活性。激光束易于聚焦、发散和导向，可以很方便地得到不同的光斑尺寸和功率大小，以适应不同的加工要求，并且通过调节外光路系统改变光束的方向，与数控机床、机器人进行连接，构成各种加工系统，实施对复杂工件进行加工。激光加工不受电磁干扰，可以在大气环境中进行加工。

(4) 微区加工。激光束不仅可以聚焦，而且可以聚焦到波长级光斑，使用这样小的高能量光斑可以进行微区加工。

(5) 可以通过透明介质对密封容器内的工件进行各种加工。

(6) 可以加工高硬度、高脆性及高熔点的多种金属、非金属材料。

激光加工具有许多特点和优势，但目前依然是一种较昂贵的能源，设备价格较高，生产成本较高。

### 1.2.2 激光加工的类型及应用

随着激光加工技术的不断发展，其应用越来越广泛，加工领域、加工形式多种多样，但从本质而言，激光加工是激光束与材料相互作用而引起材料在形状或组织性能方面的改变的过程。从这一角度可将激光加工分为以下几种类型。

#### 1.2.2.1 激光材料去除加工

在生产中常用的激光材料去除加工有激光打孔、激光切割、激光雕刻和激光刻蚀等技术。

激光打孔是最早在生产中得到应用的激光加工技术。对于高硬度、高熔点材料，常规机械加工方法很难或不能进行加工，而激光打孔则很容易实现。如金刚石模具的打孔，如采用机械钻孔，打通一个直径 0.2mm、深 1mm 的孔需要几十个小时，而激光打孔只需要 3~5min，不仅提高了效率，还能节省许多昂贵的金刚石粉。

激光切割具有切缝窄、热影响区小、切边洁净、加工精度高、光洁度高等特点，是一种

高速、高能量密度和无公害的非接触加工。

激光雕刻印染圆网技术是激光雕刻技术在工业中成功应用的典范，此技术在 1987 年应用于全球的纺织行业。

#### 1.2.2.2 激光材料增长加工

激光材料增长加工主要包括激光焊接、激光烧结和激光快速成形技术。

激光焊接是通过激光束与材料的相互作用，使材料熔化实现焊接的。激光焊接可分为脉冲激光焊接和连续激光焊接，按热力学机制又可分为激光热传导焊接和激光深穿透焊接（或称深熔焊接）。

激光快速成形技术是激光加工技术引发的一种新型制造技术，它是利用材料堆积法制造实物产品的一项高新技术。它能根据产品的三维模型数据，不借助其他的工具设备，迅速而精确地制造出所需产品，集中体现了计算机辅助设计、数控、激光加工、新材料开发等多学科、多技术的综合应用。

#### 1.2.2.3 激光材料改性

激光材料改性主要有激光热处理、激光强化、激光涂覆、激光合金化和激光非晶化、微晶化等。

#### 1.2.2.4 激光微细加工

激光微细加工起源于半导体制造工艺，是指加工尺寸约在微米级范围的加工方式。纳米级微细加工方式也称为超精细加工。目前激光微细加工已成为研究热点和发展方向。

#### 1.2.2.5 其他激光加工

激光加工在其他领域中的应用有激光清洗、激光复合加工、激光抛光等。

### 1.3 先进激光加工技术的发展方向

激光作为高技术的重要组成部分，从 20 世纪 60 年代问世以来，随着对其基本理论研究的不断深入，各种各样的新型激光器的不断研制成功，已经在工业、农业、医学、军事等领域得到广泛应用。

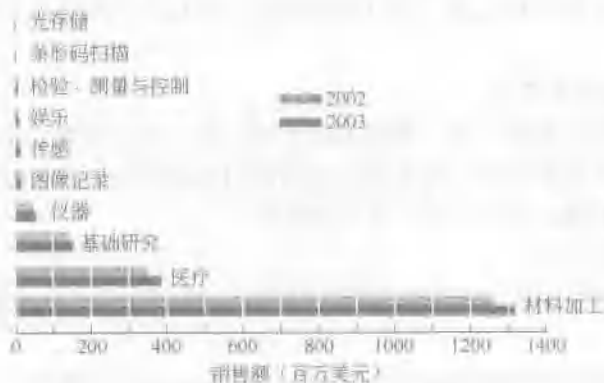


图 1-1 2002~2003 年全球非二极管激光器按应用分类的销售情况

在这些应用当中，激光材料加工的发展最快，也是目前激光应用最为广泛的领域，占据举足轻重的地位，图 1-1 给出了 2002~2003 年全球非二极管激光器按应用分类的销售情



况。1990年,用于材料加工的激光器销售额为2.56亿美元,占激光器总销售额的25%。到2002年,该销售额已经达到12.6亿美元,增长十分迅速。激光材料加工在打孔、切割、焊接、表面改性、微细加工等方面解决了许多常规方法无法加工和很难加工的问题,大大提高了生产效率和加工质量,激光加工已经被称为未来制造系统共同的加工手段。发达国家的加工业已逐步进入“光加工”时代。

在美国、日本和欧洲等国家和地区,激光加工已形成一个新兴的高技术产业,加工技术已经成熟,工业激光器和激光加工机床已经商业化。目前,用于材料加工的激光器主要有CO<sub>2</sub>激光器、YAG激光器和准分子激光器。

大功率激光器的研究取得了重大进展,输出功率为1~10kW的产品已实现商品化。该种激光器通过与光纤耦合,在汽车制造业中得到了广泛应用,并不断地扩展到重型机械领域。出于对环保的考虑,汽车等运输类机械也在追求轻量化,因而越来越多地采用铝合金。采用激光焊接铝合金是一种最有效的手段。高输出功率的YAG激光器目前已开始在重工业领域得到广泛应用。使用高功率YAG激光器切割的钢板质量与CO<sub>2</sub>激光器加工质量相当,并且YAG激光器可以通过光纤传输,将其装配在卡车上在室外使用,同样可用于建筑、遇难船只等危险地点的救援工作。高峰值功率YAG激光器在材料的高深宽比的微孔加工中有很大优势,科学家正期待通过脉冲调制或Q开关实现短脉冲和高峰值功率的YAG激光器。

CO<sub>2</sub>激光器的最大应用领域是切割和打孔,这类用途占70%以上。CO<sub>2</sub>激光器虽然在金属表面的反射率高,但由于其输出功率高、光束质量好,而得到了广泛应用。商品化的20~45kW CO<sub>2</sub>大功率激光器现已用于桥梁、造船、建筑机械和原子能技术等领域。该种激光器可切割厚度达30mm以上的钢板。由于YAG激光器的高功率化,CO<sub>2</sub>激光器未来主要的发展方向在于提高光束的质量和转换效率。研究工作者正通过提高数千瓦级激光器的光束质量来实现对中等厚度板材的高速、高精度切割,并且开始研发钢铁、造船等行业用的50kW级的激光器,用于厚钢板的焊接。

准分子激光器是以卤素气体与稀有气体混合物为工作介质的激光器,包括XeF(351nm, 3.5eV)、XeCl(308nm, 4.0eV)、KrF(248nm, 5.0eV)、ArF(193nm, 6.4eV)和F<sub>2</sub>(157nm, 7.9eV)等,目前用于加工的准分子激光器以XeCl激光器和KrF激光器为主。在步进重复光刻机中用KrF激光器作光源,40%的准分子激光器用于步进重复光刻,55%用于一般微细加工,其余则用于薄膜晶体管的退火。准分子激光器由于波长短,光子能量大,并且脉冲宽度可达纳秒量级,材料被其照射后可瞬间蒸发,因此可实现刻蚀加工。这种加工几乎没有热影响层,又无熔融残留物,因此多用于喷墨打印机的喷嘴等的加工,亦可用于硅片、美术品的清洗。并且随着激光波长变短,光子能量增加且聚光直径变小,使得这项加工向微细化方向发展。

我国1963年研制成功激光打孔机,1965年打孔机在拉丝模和手表宝石轴承上投入使用,以后相继采用CO<sub>2</sub>激光器、钕玻璃激光器、YAG激光器对不同材料、不同零件进行打孔。1976年开始在汽车制造业中使用激光切割,1978年起系统地进行了激光热处理的研究和工业应用,并取得了良好的成果。从1982年10月起,激光加工被列入“七五”、“八五”、“九五”国家科技重点攻关课题。到目前为止,我国在激光打孔、激光毛化、激光切割、激光焊接、激光热处理、激光打标记等方面已有许多非常成功的应用范例,在激光合金化和熔覆、激光制备新材料、激光快速成形等方面都进入实用化阶段。

激光加工是先进制造技术体系结构中特种加工技术中的首选加工方式。激光加工系统作