



现代机械制造技术丛书

激光加工

Laser Beam Machining

曹凤国 主编



化学工业出版社



现代机械制造技术丛书

激光加工

Laser Beam Machining



曹凤国 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

激光加工/曹凤国主编. —北京: 化学工业出版社, 2015. 4

(现代机械制造技术丛书)

ISBN 978-7-122-21782-0

I. ①激… II. ①曹… III. ①激光加工 IV. ①TG665

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 207483 号

责任编辑: 张兴辉 王 焯

文字编辑: 张燕文

责任校对: 王素芹

装帧设计: 王晓宇

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装 订: 三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 17 字数 468 千字 2015 年 6 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686)

售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 69.00 元

版权所有 违者必究

《激光加工》编委会

主 任 曹凤国
委 员 曹凤国 胡绛梅 刘 媛
康凯敏 黄建宇 黄 健
刘小同 姜 勇 张利苹

前 言

FOREWORD

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。

新的加工技术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、3D 打印（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，而且在国民经济各个领域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，本书按激光加工材料的去除加工（如切割、打孔等）、增材加工[如焊接、3D 打印（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。

本书由北京市电加工研究所、北京迪蒙吉意公司曹凤国主编，胡绛梅、刘媛、康凯敏、黄建宇、黄健、刘小同、姜勇、张利苹等参加编写。

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。

由于笔者水平所限以及技术的迅速发展，书中难免存在不妥之处，敬请广大读者批评和指正。

《激光加工》编委会



目 录

CONTENTS

第 1 章 绪论	1
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	3
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	8
1.4.1 术语	8
1.4.2 符号和单位	12
第 2 章 激光材料加工理论	14
2.1 激光产生的基本原理	14
2.1.1 光子的基本性质	14
2.1.2 光子的相干性	15
2.1.3 光子简并度	15
2.1.4 光的受激辐射	15
2.1.5 光的受激辐射放大	18
2.1.6 光的自激振荡	19
2.1.7 激光模式	20
2.2 激光的特性	21
2.2.1 激光的方向性	21
2.2.2 激光的单色性	21
2.2.3 激光的高强度 (相干光强)	21
2.2.4 激光的相干性	22
2.3 激光与材料的相互作用	23
2.3.1 材料在激光作用下的过程	23
2.3.2 材料的吸收与反射特性	24
2.4 材料在激光作用下的热力效应与组织效应	26
2.4.1 热力效应	26
2.4.2 组织效应	27
第 3 章 激光器系统	29

3.1	固体激光器	29
3.1.1	固体激光加工系统	29
3.1.2	用于热加工固体激光器	31
3.2	气体激光器	33
3.2.1	高功率 CO ₂ 激光器	34
3.2.2	准分子激光器	36
3.2.3	其他气体激光器	37
3.3	其他类型激光器	38
3.3.1	化学激光器	38
3.3.2	高功率 CO 激光器	38
3.3.3	染料激光器	39
3.3.4	光纤激光器	39
3.3.5	半导体激光器	39
第4章	激光去除加工	41
4.1	激光打孔	41
4.1.1	激光打孔的原理及特点	41
4.1.2	激光打孔的分类	44
4.1.3	激光打孔的加工系统	46
4.1.4	激光打孔工艺	49
4.1.5	典型材料的激光打孔	55
4.2	激光切割	67
4.2.1	激光切割的特点	67
4.2.2	激光切割的方式	68
4.2.3	影响切割质量的因素	70
4.2.4	常用工程材料的激光切割	77
4.3	激光打标、雕刻	81
4.3.1	激光打标	81
4.3.2	激光雕刻	84
第5章	激光焊接技术	86
5.1	概述	86
5.2	激光热传导焊接	86
5.2.1	激光热传导焊接基本原理	86
5.2.2	激光焊接工艺参数与焊接方法	87
5.3	激光深熔焊	93
5.3.1	深熔焊理论	93
5.3.2	深熔焊的主要影响因素	94
5.3.3	深熔焊的接头形式与质量	95
5.3.4	常用材料的激光焊接	96
5.3.5	人造金刚石工具的激光焊接	98
5.3.6	塑料的激光焊接	101
5.4	激光焊接的应用及设备	104
5.4.1	激光焊接的应用	104

5.4.2	激光焊接设备	105
5.5	激光焊接的优点和局限性	106
5.5.1	激光焊接的优点	106
5.5.2	激光焊接的局限性	107
第6章	激光表面改性技术	108
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	111
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	120
6.3.1	激光表面熔覆	120
6.3.2	激光合金化	126
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	130
6.4.1	非晶态金属的结构与性质	131
6.4.2	激光非晶化的特点	132
6.4.3	激光非晶化的原理	132
6.4.4	激光非晶化工艺及影响因素	133
6.4.5	激光非晶化的应用	134
6.5	激光冲击硬化	135
6.5.1	激光冲击硬化的特点	135
6.5.2	激光冲击处理的模型	135
6.5.3	激光冲击硬化对材料力学性能的影响	136
6.5.4	激光冲击处理的发展	138
6.6	复合表面改性技术	139
6.6.1	两种复合表面改性技术	139
6.6.2	两种以上复合表面改性技术	140
第7章	激光3D打印技术(激光快速成形技术)	142
7.1	概述	142
7.2	3D打印(快速成形)技术的基本原理及特征	143
7.2.1	3D打印(快速成形)技术的原理	143
7.2.2	3D打印(快速成形)技术的工艺过程	144
7.2.3	3D打印(快速成形)技术的特征	144
7.3	3D打印(快速成形)主要的工艺方法	145
7.3.1	液态光敏树脂选择性固化	145
7.3.2	粉末材料选择性激光烧结	147
7.3.3	熔融沉积成形	149

7.3.4	薄型材料选择性切割	149
7.3.5	固基光敏液相法	150
7.3.6	三维打印	151
7.3.7	复合成形法	152
7.4	3D 打印(快速成形)的软件与设备	153
7.4.1	激光 3D 打印(快速成形)前期数据处理	153
7.4.2	激光 3D 打印(快速成形)设备	156
7.5	3D 打印(快速成形)用材料	157
7.5.1	3D 打印(快速成形)工艺对材料的要求	157
7.5.2	3D 打印(快速成形)材料的分类	158
7.6	激光烧结 3D 打印(快速成形)	162
7.6.1	激光烧结 3D 打印(快速成形)机理	162
7.6.2	金属粉末的激光烧结 3D 打印(快速成形)	162
7.6.3	激光烧结 3D 打印(快速成形)工艺因素	164
7.7	反求工程与 3D 打印(快速成形)集成技术	170
7.7.1	反求工程	170
7.7.2	数据获取方法	171
7.7.3	数据处理	173
7.7.4	三维重构	174
7.8	快速模具制造技术	174
7.8.1	快速模具制造技术及其分类	174
7.8.2	快速金属模具制造技术	178
7.8.3	快速模具制造技术的发展方向	185
第 8 章	其他激光加工技术	187
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	激光光存技术	194
8.2.1	激光光存技术的发展	194
8.2.2	激光光盘使用的激光器	194
8.2.3	激光光盘的读/写工作原理	195
8.3	激光抛光技术	197
8.3.1	激光抛光的特点	197
8.3.2	激光抛光的原理	198
8.3.3	激光抛光系统的主要构成	199
8.3.4	影响激光抛光的工艺因素	199
8.3.5	激光抛光技术的发展和前景	201
8.4	激光复合加工技术	202
8.4.1	激光辅助车削技术	202
8.4.2	激光辅助电镀技术	203

8.4.3	激光与步冲复合技术	204
8.4.4	激光与水射流复合切割技术	204
8.4.5	激光复合焊接技术	205
8.4.6	激光与电火花复合加工技术	208
8.4.7	激光与机器人复合加工技术	210
第9章 激光微细加工		212
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	220
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	222
9.2.4	飞秒脉冲激光的精细加工应用	226
9.3	激光微型机械加工	231
9.3.1	微型机械加工	231
9.3.2	准分子激光直写微细加工	232
9.3.3	激光 LIGA 技术	233
9.3.4	激光化学加工技术	236
9.3.5	微型机电系统的激光辅助操控与装配	236
9.4	激光诱导原子加工技术	237
9.4.1	原子层外延生长	237
9.4.2	原子层刻蚀	238
9.4.3	原子层掺杂	239
9.5	激光制备纳米材料	239
9.5.1	激光制备纳米材料的特点	239
9.5.2	激光诱导化学气相沉积法	239
9.5.3	激光烧蚀法	242
9.6	脉冲激光沉积薄膜技术	243
9.6.1	脉冲激光沉积薄膜技术的特点	243
9.6.2	脉冲激光沉积薄膜的原理	244
9.6.3	PLD 沉积薄膜的装置	246
9.6.4	PLD 沉积工艺	246
9.6.5	PLD 制备新材料应用	247
9.6.6	脉冲激光沉积薄膜技术的发展方向	248
9.7	激光-扫描电子探针技术	249
9.7.1	激光-扫描电子探针技术的基本原理	249
9.7.2	纳米加工的应用	250
9.7.3	Laser-SPM 技术的发展	251
第10章 激光加工中的安全防护及标准		253
10.1	激光的危险性	253

10.1.1	光的危害	253
10.1.2	非光的危害	255
10.2	激光危险性的分类	255
10.2.1	分类过程	255
10.2.2	分级	255
10.3	激光防护	256
10.3.1	激光防护的主要技术指标	256
10.3.2	激光防护的通用操作规则	257
10.4	激光安全标准	257
10.4.1	激光安全的国家标准	257
10.4.2	激光防护镜标准	258
参考文献		259

绪 论

自从 20 世纪 60 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。1963~1965 年相继发明了 CO₂ 激光器和 YAG 激光器, 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。

50 多年来, 激光技术及其应用发展迅猛, 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。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上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 CO₂ 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 CO₂ 激光器; 1971 年出现了第一台商用 1kW CO₂ 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, 并且成为在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, YGA 激光器和 CO₂ 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, 聚光腔性能的改进, 冷却系统和激光谐振腔结构的不断完善, 使 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 年代后期, CO₂ 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，输出功率最大发展到数千瓦。CO₂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。

我国的激光加工技术始于20世纪60年代。1957年，王大珩等在长春建立了我国第一所光学专业研究所——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 我国研制成功的第一台各类激光器

名 称	研制成功时间	研 制 人
He-Ne 激光器	1963 年 7 月	邓锡铭等
掺钕玻璃激光器	1963 年 6 月	千福熹等
GaAs 同质结半导体激光器	1963 年 12 月	王守武等
脉冲 Ar ⁺ 激光器	1964 年 10 月	万重怡等
CO ₂ 分子激光器	1965 年 9 月	王润文等
CH ₃ I 化学激光器	1966 年 3 月	邓锡铭等
YAG 激光器	1966 年 7 月	屈乾华等

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。

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CO₂激光器的功率，采用快速轴流的结构，输出功率已达几千瓦直至上万瓦；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几百瓦，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、光纤激光器等，其中在微细加工领域发挥重要作用的是准分子（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CO₂激光器主要以激光热作用于材料进行加工，称其为热加工。准分子激光加工是极具前途的加工技术，在材料加工特别是微细加工领域已开始得到广泛应用。另外，光纤激光器在低功率激光加工领域巩固其市场份额之后不断地扩大在高功率激光加工领域的份额，目前已成为研究和发展的焦点领域，CO₂激光器的传统优势逐渐被光纤激光器所取代。

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。激光加工技术涉及光、机电、材料及检测等多门学科，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加工、军事、通信等各个领域，21世纪被誉为“光加工时代”。激光技术在我国经过几十年的发展，取得了上千项科技成果，许多已用于生产实践，激光加工设备产量平均每年以20%的速度增长，为传统产业的技术改造、提高产品质量解决了许多问题，如三维激光技术正在宝钢、本钢等大型钢厂推广，将改变我国汽车覆盖件的钢板完全依赖进口的状态，激光标记机与激光焊接机的质量、功能、价格符合国内市场目前的需求，市场占有率达90%以上。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，2010年全球激光与光电产业大幅增长，市场规模突破4000亿美元，增长率近30%，预计到2015年全球激光与光电产业市场将突破1万亿美元。以激光技术为基础的光电产业可能会取代传统电子产业。激光加工、激光通信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，对非照射的区域几乎没有影响。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像管焊接中。

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，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方法。

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 激光材料增材加工

激光材料增材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，现被称为 3D 打印技术，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内的加工方式。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。

从全球激光产品的应用领域来看，在这些应用当中，材料加工行业仍是其主要的应用市场，所占比重为 35.2%；通信行业排名第二，所占比重为 30.6%；数据存储行业占据第三位，所占比重为 12.6%。

近十年来，随着工业激光应用市场在不断扩大，激光加工领域也不断开拓，由传统的钟表、电池、衣扣等轻工行业向机械制造业、汽车制造业、航空、动力和能源以及医学和牙科仪器设备制造业等应用领域拓展，有效拉动了激光加工设备的需求。

2011 年，全球激光工业加工设备销售额获得了强劲的两位数增长。2011 年全球激光系统销售收入 70.6 亿美元，同比增长 16%，其中，激光器销售收入 19.56 亿美元，同比增长

18%。增长速度十分迅速，表 1-2 列出了 2008~2012 年全球激光器及其应用系统的销售收入总和。

表 1-2 2008~2012 年全球激光器及其应用系统的销售收入总和 亿美元

年度	2008	2009	2009 较 2008 增长率/%	2010	2010 较 2009 增长率/%	2011	2011 较 2010 增长率/%	2012	2012 较 2011 增长率/%
工业激光器	17.6	12.31	-30	16.57	35	19.56	18	20.6	5
激光加工系统	60.81	48.65	-20	60.9	25	70.6	16	73.41	4

我国激光产品主要应用于工业加工，占据了 40% 以上的市场空间。2005~2011 年，我国激光加工设备的增长较快，年均增速超过 20%，高于世界激光加工设备年均增长率。2008 年后，在调整结构、拉动内需等措施的刺激下，我国激光在铁路机车、工程机械、军工、新能源等行业应用获得大幅增长。2009 年，我国激光加工设备行业规模达到 46 亿元，2010 年突破 55 亿元，2011 年约为 60 亿元，激光加工设备市场呈现出稳定、高速增长的态势。

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 CO₂ 激光器、YAG 激光器、准分子激光器及光纤激光器。表 1-3 列出了 2010~2012 年全球不同种类激光器销售收入。其中 CO₂ 激光器、光纤激光器和二极管/准分子激光器均以两位数以上的速率增长，光纤激光器 49% 的强劲增长率主要来自于薄板切割加工业务。CO₂ 激光器保持了 14% 的增长率，主要源自激光加工站。尽管 CO₂ 激光加工系统在薄板切割加工市场中受到了高速增长的光纤激光加工机的侵蚀，但其长期形成的主流市场优势仍使其保持了 14% 的增长。

表 1-3 2010~2012 年全球不同种类激光器销售收入 亿美元

年度	2010	2011	2011 较 2010 增长率/%	2012	2012 较 2011 增长率/%
CO ₂ 激光器	8.7	9.89	14	10.16	3
固体激光器	4.02	4.19	4	4.54	8
光纤激光器	3.26	4.86	49	5.16	6
二极管/准分子激光器	0.6	0.7	17	0.75	7

大功率激光器的研究取得了重大进展，目前输出功率已经达到 10kW 以上，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 激光器已开始从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 CO₂ 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。高峰值功率激光器与传统的激光器相比，具有脉冲能量大（几十毫焦乃至几焦耳）、脉冲宽度短（从飞秒、皮秒到亚纳秒和纳秒左右）、峰值功率更高（兆瓦乃至吉瓦）、实现难度更大等特点。这类激光器在激光加工、流场显示、海洋探测、光电对抗、激光医疗、大气监测、激光通信、谐波变换、X 射线激光器、自由电子加速器、惯性约束核聚变、

超短脉冲掺钛蓝宝石可调谐激光器的研究等领域同比拥有更多的优势。目前，这类激光器的技术主要为国外的如美国相干、光谱物理、德国挪拿、白俄罗斯 Solar 等大公司所掌握。目前，大功率激光器正在向着高亮度、高光束质量的方向发展。

CO₂激光器的最大应用领域是切割和打孔，这类用途占 70% 以上。CO₂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 CO₂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，CO₂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。在金属薄板激光加工中，材料对 CO₂激光的吸收率比光纤激光要低一直是市场竞争中处于不利的地方。但随着径向偏振新技术的出现，CO₂激光材料吸收率方面的不足不仅可弥补，而且会反超光纤激光器。

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 F₂ (157nm, 7.9eV) 等，目前用于加工的准分子激光器以 XeCl 和 KrF 为主。准分子材料切除的本质是光烧蚀，它几乎没有热影响区域，而且使用准分子时，切口干净、轮廓分明。这些特点使它十分适合进行亚微米范围的微加工。此外，短波长的紫外 (UV) 准分子辐射很轻易被很多材料所吸收，使它不论对硬质材料 (如硅和陶瓷) 还是对软质聚合物都能进行有效加工。紫外准分子激光波长的范围较广，这意味着基本上对于任何需要加工的材料都能够找到合适的波长。大型的多模平顶准分子光束让大面积图案制作所需的光束整形和掩模技术成为可能，使加工效率更高，且能得到复杂的三维图案。目前随着激光波长变短，光子能量增加且聚光直径变小，这项加工正向微细化方向发展。

光纤激光器具有转换效率高 (可高达 20%)；寿命长 (平均无故障工作时间在 10 万小时以上)；可在恶劣的环境下工作 (由于其谐振腔置于光纤内部，即使在高冲击、高振动、高湿度、有灰尘的条件下也可正常运转，而环境温度允许在 -20~+70℃ 之间)；无需庞大的水冷系统，只需简单的风冷即可；外形紧凑、体积小 (光纤激光器模块体积只有一本字典大小)；易于系统集成等特点。目前采用的各种体积庞大的传统激光器 (如普通激光加工和打标使用的 CO₂ 和 YAG 激光器)，在许多领域或将被这种新型的高效率、长寿命、小体积、大功率光纤激光器所替代。目前，单根光纤激光的连续波输出功率从百瓦级、千瓦级向万瓦级发展，在保持光束质量不变的前提下大大提升单根光纤激光的输出功率，将是高功率光纤激光发展的主要研究内容之一。预计通过掺杂光纤、更先进的设计和采用更高功率的泵浦源，单根光纤输出功率将达到万瓦级。另外，采用基于种子激光振荡放大 MOPA 的脉冲光纤激光器，将高光束质量、小功率的激光器作为种子光源，双包层光纤作为放大器，容易获得高平均功率、高脉冲能量的脉冲激光输出，也是目前研究热点。光纤激光的工业应用从低功率的打标、雕刻 (十瓦、百瓦级) 向更高功率的金属和陶瓷的切割、焊接等方面发展 (千瓦到万瓦级)，在汽车工业和船舶工业中，结构紧凑、实用方便的高功率光纤激光器具有巨大的市场潜力。

我国 1963 年研制成功激光打孔机，1965 年打孔机在拉丝膜和手表宝石轴承上投入实际使用，以后相继采用 CO₂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”至“十二五”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 3D 打印等方面都进入实用化阶段。

激光 3D 打印技术，也称激光快速成形技术、激光增材制造技术，是近年来非常时尚而