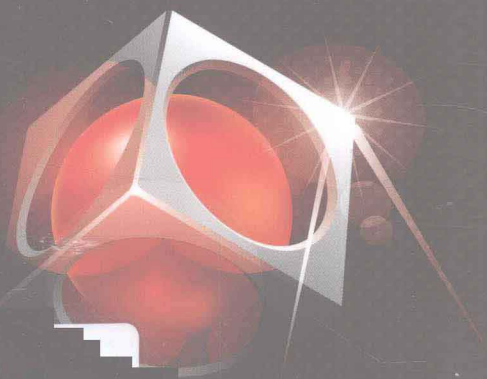


# 激光焊接 切割 熔覆技术

李亚江 李嘉宁 等编著

JIGUANGHANJIE  
QIEGE  
RONGFUJISHU

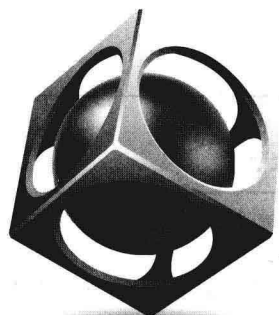


化学工业出版社

# 激光焊接 切割 熔覆技术

李亚江 李嘉宁 等编著

JIGUANGHANJIE  
QIEGE  
RONGFUJISHU



化学工业出版社

· 北京 ·

激光加工技术是 21 世纪最有发展前景的制造技术之一，众多的高新技术成果与激光技术有着密切的联系。激光束具有可以在大气中进行焊接、切割和熔覆的特点，聚焦后的光斑直径只有 0.1~1mm，热输入量小，加工质量好。激光加工技术的广泛应用产生了显著的经济和社会效益，符合“优质、高效、低耗、无污染”的发展方向，是值得大力推广的先进制造技术。本书的特点是从实用性角度对激光焊接、切割、熔覆技术的发展及应用做了简明的阐述，突出科学性、先进性和新颖性等特色，给出一些激光加工技术（如激光焊接、切割和熔覆等）成功应用的实例，有助于推进激光技术的发展。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

激光焊接/切割/熔覆技术/李亚江, 李嘉宁等编著.

北京: 化学工业出版社, 2012. 7

ISBN 978-7-122-14440-9

I. 激… II. ①李…②李… III. ①激光焊接-基本知识  
②激光切割-基本知识③激光熔覆-基本知识 IV. TG4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 112962 号

责任编辑: 周 红  
责任校对: 宋 玮

文字编辑: 陈 晶  
装帧设计: 王晓华

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 装: 北京云浩印刷有限责任公司

710mm×1000mm 1/16 印张 19 1/4 字数 357 千字 2012 年 9 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: 78.00 元

版权所有 违者必究

# 前言 FOREWORD

激光焊接 / 切割 / 熔覆技术  
JIGUANGHANJIE QIEGE RONGFUJISHU

激光加工技术是 21 世纪最有发展前景的制造技术之一，在科学技术进步和社会发展中发挥了极其重要的作用，众多的高新技术成果与激光技术有着密切的联系。近年来，随着大功率、高性能激光加工设备的不断涌现，激光焊接、切割和熔覆等加工技术日益引起美国、日本、德国等发达国家的重视，并在汽车、能源、电子、航空航天等领域得到快速发展。

激光束具有可以在大气中进行焊接、切割和熔覆的特点，聚焦后的光斑直径只有 0.1~1mm，既可以切割、熔覆，又可以完成精密焊接，热输入量小，接头质量好。显然，激光技术的广泛应用产生了显著的经济和社会效益，符合“优质、高效、低耗、无污染”生产的发展方向，是值得大力推广的先进制造技术。

本书系统阐述了近年来激光焊接、切割和熔覆技术的发展及应用，突出科学性、先进性和新颖性等特色，同时给出一些实践中的激光加工应用实例（如激光焊接、切割和熔覆等），有助于扩大读者的视野，增强解决问题的能力。

本书由李亚江、李嘉宁等编著，参加本书编写的还有王娟、吴娜、秦国梁、魏守征、孙俊生、胡庆贤、刘鹏、许有肖、郑德双、马海军、蒋庆磊、夏春智、胡效东、张蕾等。

本书参考了相关文献，在此一并表示诚挚的谢意。

由于编者水平所限，书中不足之处敬请读者批评指正。

编著者

<b>第 1 章 概述</b>	1/
1.1 激光加工的原理与特点 .....	2
1.1.1 激光加工的工作原理 .....	2
1.1.2 激光加工技术的特性 .....	3
1.1.3 激光加工工艺 .....	5
1.2 激光加工现状及发展趋势 .....	9
1.2.1 激光加工的技术现状 .....	10
1.2.2 激光加工技术的发展趋势 .....	12
1.2.3 存在的问题和市场展望 .....	13
<b>第 2 章 激光加工基础</b>	15/
2.1 激光的物理特性 .....	16
2.1.1 激光的特点 .....	16
2.1.2 激光产生的基本原理 .....	17
2.1.3 表征激光光束质量的特征参数 .....	19
2.1.4 激光光束的输出形状 .....	23
2.2 激光器及加工系统 .....	23
2.2.1 激光器的基本组成及发展 .....	23
2.2.2 CO <sub>2</sub> 气体激光器 .....	26
2.2.3 半导体激光器 .....	31
2.2.4 YAG 固体激光器 .....	36
2.2.5 光纤激光器 .....	40
<b>第 3 章 激光焊</b>	45/
3.1 激光焊的原理、特点及应用 .....	46
3.1.1 激光焊原理及分类 .....	46
3.1.2 激光焊熔透状态及焊缝形成 .....	53
3.1.3 激光焊的特点及应用 .....	56
3.2 激光焊设备及工艺 .....	61
3.2.1 激光焊设备及技术参数 .....	61
3.2.2 脉冲激光焊工艺及参数 .....	64
3.2.3 连续激光焊工艺及参数 .....	68
3.2.4 激光钎焊 .....	79
3.3 激光复合(增强)焊接技术 .....	81

# 目 录

## CONTENTS

激光焊接 / 切割 / 熔覆技术 JIGUANGHANJIE QIEGE RONGFUJISHU

3.3.1	激光-电弧复合焊的原理	81
3.3.2	激光-电弧复合焊接的优势	82
3.3.3	激光与电弧的复合方式	85
3.3.4	激光-电弧复合焊参数对焊缝成形的影响	88
3.3.5	激光-电弧复合焊接技术的应用	92
3.4	不同材料的激光焊	95
3.4.1	钢的激光焊	96
3.4.2	有色金属的激光焊	99
3.4.3	高温合金的激光焊	107
3.4.4	异种材料的激光焊	108
3.5	激光焊的应用示例	110
3.5.1	42CrMo 钢伞形齿轮轴的窄间隙激光焊	110
3.5.2	冷轧钢与高强度镀锌钢车身的 CO <sub>2</sub> 激光拼焊	112
3.5.3	铝/钢异种金属的激光-MIG 复合焊接	113
3.5.4	大厚度不锈钢的激光焊	115
3.5.5	不锈钢超薄板的脉冲激光焊	116
3.5.6	管线钢的激光焊	118
3.5.7	汽车发动机排气阀脉冲激光焊	120
3.5.8	汽车高强钢板光纤激光焊	122
<b>第 4 章 激光切割</b>		<b>125</b>
4.1	激光切割原理、特点及应用	126
4.1.1	激光切割原理及分类	126
4.1.2	激光切割的特点	129
4.1.3	激光切割的应用范围	131
4.1.4	工程材料的激光切割	133
4.2	激光切割设备	136
4.2.1	激光切割设备的组成	136
4.2.2	激光切割用的激光器	138
4.2.3	激光切割的割炬	141
4.2.4	数控激光切割机和切割机器人	146
4.2.5	激光切割设备的技术参数	149
4.3	激光切割工艺	152
4.3.1	激光切割的工艺参数	152
4.3.2	激光切割的操作程序及技术要点	162

4.3.3	激光切割的质量及控制 .....	166
4.4	激光切割技术的应用 .....	174
4.4.1	钢铁材料的激光切割工艺 .....	174
4.4.2	有色金属的激光切割工艺 .....	186
4.4.3	非金属材料的激光切割工艺 .....	194
4.4.4	汽车桥壳的激光切割 .....	196
<b>第 5 章</b>	<b>激光熔覆 .....</b>	<b>199 /</b>
5.1	激光熔覆原理与特点 .....	200
5.1.1	激光熔覆的原理 .....	200
5.1.2	激光熔覆的分类 .....	201
5.1.3	激光熔覆的特点及应用 .....	203
5.1.4	激光熔覆的现状及存在问题 .....	207
5.2	激光熔覆设备与材料 .....	210
5.2.1	激光熔覆设备 .....	210
5.2.2	激光熔覆材料 .....	212
5.2.3	激光熔覆材料的设计和选用 .....	219
5.2.4	熔覆材料的添加方式 .....	223
5.3	激光熔覆工艺 .....	225
5.3.1	激光熔覆的工艺特点 .....	225
5.3.2	激光熔覆的工艺参数 .....	226
5.3.3	激光复合熔覆技术 .....	231
5.4	激光熔覆层的组织与性能 .....	233
5.4.1	激光熔覆层的显微组织特征 .....	233
5.4.2	激光熔覆层的性能 .....	235
5.4.3	激光熔覆层的耐磨性评定 .....	240
5.4.4	激光熔覆层的应力状态 .....	242
5.5	激光熔覆技术的应用 .....	244
5.5.1	钢铁材料的激光熔覆 .....	244
5.5.2	镁合金的激光熔覆 .....	247
5.5.3	钛合金的激光熔覆 .....	248
<b>第 6 章</b>	<b>激光质量及监测 .....</b>	<b>257 /</b>
6.1	激光器的光束质量及聚焦质量 .....	258
6.1.1	激光器的光束质量 .....	258

目  
录

## CONTENTS

6.1.2	光束质量对聚焦的影响 .....	263
6.1.3	引起激光束焦点位置波动的主要因素 .....	267
6.2	激光与材料的相互作用 .....	272
6.2.1	材料吸收激光的规律及影响因素 .....	272
6.2.2	激光作用下材料的物态变化 .....	277
6.3	激光加工过程监测 .....	279
6.3.1	激光与材料作用过程的监测 .....	279
6.3.2	激光束焦点位置检测与控制 .....	286
<b>第 7 章 激光加工安全与防护</b> .....		<b>295</b> /
7.1	激光辐射对人体的危害 .....	296
7.2	激光危害的工程控制 .....	297
7.3	激光的安全防护 .....	297
<b>参考文献</b> .....		<b>299</b> /



# 第1章

## 概述

激光焊接 / 切割 / 熔覆技术

JIGUANGHANJIE QIEGE RONGFUJISHU

# Chapter 1

激光 (laser) 是英文 Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation 的缩写, 意为“通过受激辐射实现光的放大”。作为 20 世纪科学技术发展的重要标志和现代信息社会光电子技术的支柱之一, 激光技术及相关产业的发展受到世界先进国家的高度重视。激光加工是激光应用最有发展前景的领域, 特别是激光焊接、激光切割和激光熔覆技术, 近年来更是发展迅速, 产生了巨大的经济和社会效益。

## 1.1 激光加工的原理与特点

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 (包括金属与非金属) 进行切割、焊接、表面处理、打孔、微加工等的一门技术。激光加工作为先进制造技术已广泛应用于汽车、电子、电器、航空、冶金、机械制造等工业领域, 对提高产品质量和劳动生产率、自动化、无污染、减少材料消耗等起到越来越重要的作用。

### 1.1.1 激光加工的工作原理

激光加工是以聚焦的激光束作为热源轰击工件, 对金属或非金属材料进行熔化形成小孔、切口、连接、熔覆等的加工方法。激光加工实质上是激光与非透明物质相互作用的过程, 微观上是一个量子过程, 宏观上则表现为反射、吸收、加热、熔化、气化等现象。

在不同功率密度的激光束照射下, 材料表面区域发生各种不同的变化, 这些变化包括表面温度升高、熔化、气化、形成小孔以及产生光致等离子体等。图 1.1 为不同功率密度激光辐射作用下金属材料表面产生的几种物态变化。

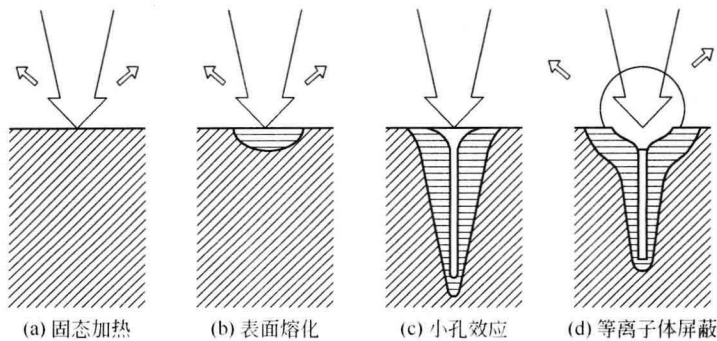


图 1.1 金属材料表面在激光作用下几种物态的变化

当激光功率密度小于  $10^4 \text{ W/cm}^2$  数量级时, 金属吸收激光能量只引起材料表层温度的升高, 但维持固相不变, 主要用于零件的表面热处理、相变硬化处理

或钎焊等。当激光功率密度在  $10^4 \sim 10^6 \text{ W/cm}^2$  数量级范围时, 产生热传导型加热, 材料表层将发生熔化, 主要用于金属的表面重熔、合金化、熔覆和热传导型焊接(如薄板高速焊及精密点焊等)。

当激光功率密度达到  $10^6 \text{ W/cm}^2$  数量级时, 材料表面在激光束的照射下, 激光热源中心加热温度达到金属的沸点, 形成等离子蒸气而强烈气化, 在气化膨胀压力作用下, 液态表面向下凹陷形成深熔小孔; 与此同时, 金属蒸气在激光束的作用下电离产生光致等离子体。这一阶段主要用于激光深熔焊接、切割和打孔等。

当激光功率密度大于  $10^7 \text{ W/cm}^2$  数量级时, 光致等离子体将逆着激光束的入射方向传播, 形成等离子体云团, 出现等离子体对激光的屏蔽现象。这一阶段一般只适用于采用脉冲激光进行打孔、冲击硬化等加工。

激光加工利用高功率密度的激光束照射工件, 使材料熔化气化而进行穿孔、切割和焊接等特种加工。早期的激光加工由于功率较小, 大多用于打小孔和微型焊接。到 20 世纪 70 年代, 随着大功率  $\text{CO}_2$  激光器、高重复频率钕铝石榴石(YAG)激光器的出现, 以及对激光加工机理和工艺的深入研究, 激光加工技术有了很大进展, 使用范围随之扩大。数千瓦的激光加工设备已用于各种材料的高速切割、深熔焊接和材料表面处理等方面。各种专用的激光加工设备竞相出现, 并与光电跟踪、计算机数字控制、工业机器人等技术相结合, 大大提高了激光加工的自动化水平和使用功能。

激光可解释成将电能、化学能、热能、光能或核能等原始能源转换成某些特定光频(紫外光、可见光或红外光)的电磁辐射束。转换形态在某些固态、液态或气态介质中很容易进行。当这些介质以原子或分子形态被激发, 便产生相位几乎相同且近乎单一波长的光束——激光。由于具有同相位及单一波长, 差异角非常小, 在被高度聚集以提供焊接、切割和熔覆等功能前可传送的距离相当长。

激光加工装备由四大部分组成, 分别是激光器、光学系统、机械系统、控制及检测系统。从激光器输出的高强度激光束经过透镜聚焦到工件上, 其焦点处的功率密度高达  $10^6 \sim 10^{12} \text{ W/cm}^2$  (温度高达 1 万摄氏度以上), 任何材料都会瞬时熔化、气化。激光加工就是利用这种光能的热效应对材料进行焊接、打孔和切割等加工的。通常用于加工的激光器主要是 YAG 固体激光器和  $\text{CO}_2$  气体激光器。由于  $\text{CO}_2$  激光器具有结构简单、输出功率范围大和能量转换效率高等优点, 可广泛应用于材料的激光加工。

### 1.1.2 激光加工技术的特性

世界上的第一个激光束于 1960 年利用闪光灯泡激发红宝石晶粒所产生, 因

受限于晶体的热容量，只能产生很短暂的脉冲光束且频率很低。虽然瞬间脉冲峰值能量可高达  $10^6$  W，但仍属于低能量输出。

使用钕（Nd）为激发元素的钕铝石榴石晶棒（Nd：YAG）可产生  $1\sim 8$  kW 的连续单一波长光束。YAG 激光（波长为  $1.06\mu\text{m}$ ），可以通过柔性光纤连接到激光加工头，设备布局灵活，适用焊接厚度  $0.5\sim 6$  mm。使用  $\text{CO}_2$  为激发物的  $\text{CO}_2$  激光（波长  $10.6\mu\text{m}$ ），输出能量可达  $25$  kW，可对厚度  $2$  mm 板单道全熔透焊接，工业界已广泛用于金属的加工。

自 20 世纪 60 年代以来，人们以绝缘晶体或玻璃为工作物质制得了固体激光器，又以气体或金属蒸气作为工作物质制得气体激光器。因二极管的体积小、寿命长、效率高，人们制得了半导体二极管激光器。正是因为如此多的不同种类的激光器的出现，才推动了激光应用于一系列新的学科和技术领域，例如：激光全息术，激光加工，激光检查，激光光谱分析，激光医疗，激光制导，激光寻的器，激光目标指示器，激光雷达等，激光应用不胜枚举。

激光加工技术与传统加工技术相比具有很多优点，所以得到广泛的应用。尤其适合新产品的开发。一旦产品图纸形成后，马上可以进行激光加工，可以在最短的时间内得到新产品的实物。

激光加工的主要特点如下：

① 光点小，能量集中，热影响区小；激光束易于聚焦、导向，便于自动化控制。

② 不接触加工工件，对工件无污染；不受电磁干扰，与电子束加工相比应用更方便。

③ 加工范围广泛，几乎可对任何材料进行雕刻切割。可根据电脑输出的图样进行高速雕刻和切割，且激光切割的速度与线切割的速度相比要快很多。

④ 安全可靠：采用非接触式加工，不会对材料造成机械挤压或机械应力。精确细致：加工精度可达到  $0.1$  mm。效果一致：保证同一批次的加工效果几乎完全一致。

⑤ 切割缝细小：激光切割的割缝一般在  $0.1\sim 0.2$  mm。切割面光滑：激光切割的切割面无毛刺。热变形小：激光加工的激光割缝细、速度快、能量集中，因此传到被切割材料上的热量小，引起材料的变形也非常小。

⑥ 适合大件产品的加工：大件产品的模具制造费用很高，激光加工不需任何模具制造，而且激光加工完全避免材料冲剪时形成的塌边，可以大幅度地降低企业的生产成本，提高产品的档次。

⑦ 成本低廉：不受加工数量的限制，对于小批量加工服务，激光加工更加便宜。

⑧ 节省材料：激光加工采用电脑编程，可以把不同形状的产品进行材料的套裁，最大限度地提高材料的利用率，大大降低了材料成本。

### 1.1.3 激光加工工艺

激光技术是涉及光、机、电、材料及检测等多门学科的综合技术。传统上看，激光加工工艺包括切割、焊接、表面处理、熔覆、打孔（标）、划线等各种加工工艺。不同的材料加工方式对激光制造系统的激光功率和光束质量的要求如图 1.2 所示。

#### (1) 激光焊接技术

激光焊是激光加工技术应用的重要方面之一。激光辐射加热工件表面，表面热量通过热传导向内部扩散，通过控制激光脉冲的宽度、能量、功率密度和重复频率等参数，使工件熔化，形成特定的熔池。由于其独特的优点，已成功地应用于微小型零件焊接中。大功率 CO<sub>2</sub> 激光器及大功率 YAG 激光器的出现，开辟了激光焊接的新领域。获得了以小孔效应为基础的深熔焊，在机械、汽车、钢铁等工业部门获得了日益广泛的应用。

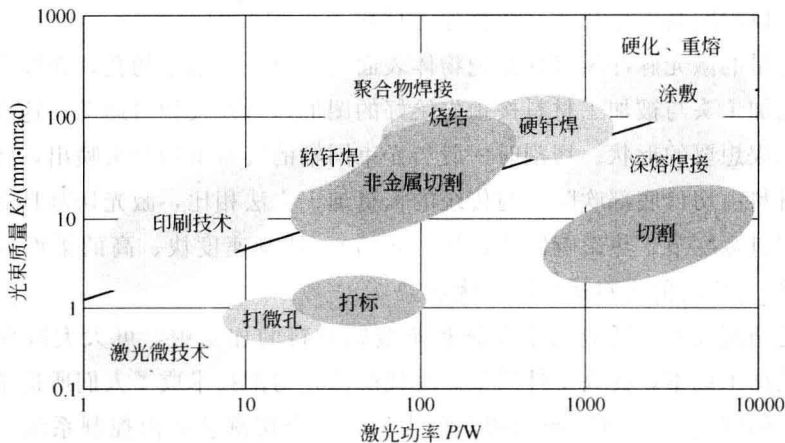


图 1.2 材料加工方式对激光功率和光束质量的要求

激光焊可焊接难以接近的部位，施行非接触远距离的焊接，具有很大的灵活性。YAG 激光技术中采用光纤传输技术，使激光焊接技术获得了更为广泛的应用。激光束易实现光束按时间与空间分光，能进行多光束同时加工，为更精密的焊接提供了条件。例如，可用于汽车车身厚薄板、汽车零件、锂电池、心脏起搏器、密封继电器等密封器件以及各种不允许焊接污染和变形的器件。

激光焊接技术具有熔池净化效应，能纯净焊缝金属，适用于相同和不同金属材料间的焊接。激光焊接能量密度高，对高熔点、高反射率、高热导率和物理特

性相差很大的金属焊接特别有利。

激光焊接的主要优点是：速度快、熔深大、变形小。能在室温或特殊条件下进行焊接。激光通过电磁场，光束不会偏移；激光在空气及某种气体环境中均能施焊，并能对玻璃或对光束透明的材料进行焊接。激光聚焦后，功率密度高，焊接时的深宽比可达 5 : 1，最高可达 10 : 1。可焊接难熔材料，如钛、石英等，并能对异种材料施焊，效果良好。例如，将铜和钼两种性质不同的材料焊接在一起，合格率可达 100%。也可进行微型焊接，激光束经聚焦后可获得很小的光斑，能精密定位，可应用于大批量自动化生产的微小型元件的组焊中，如集成电路引线、钟表游丝、显像管电子枪组装等。由于采用了激光焊，生产效率高，热影响区小，焊点无污染，大大提高了焊接质量。

### (2) 激光切割技术

激光切割是应用激光聚焦后产生的高功率密度能量来实现的。在计算机的控制下，通过脉冲使激光器放电，输出受控的重复高频率的脉冲激光，形成一定频率、一定脉宽的激光束。该脉冲激光束经过光路传导、反射并通过聚焦透镜组聚焦在加工物体的表面上，形成一个个细微的、高能量密度光斑，焦点位于待加工面附近，以瞬间高温熔化或气化被加工材料。

高能量的激光脉冲瞬间就能把物体表面溅射出一个细小的孔，在计算机控制下，激光加工头与被加工材料按预先绘好的图形进行连续相对运动，这样就会把物体加工成想要的形状。切割时一股与光束同轴的气流由切割头喷出，将熔化或气化的材料由切口底部吹除。与传统的板材加工方法相比，激光切割具有切割质量好（切口宽度窄、热影响区小、切口光洁）、切割速度快、高的柔性（可切割任意形状）、广泛的材料适应性等优点。

激光切割技术广泛应用于金属和非金属材料的加工中，可大大减少加工时间，降低加工成本，提高工件质量。现代的激光切割技术成了人们所追求的“削铁如泥”的宝剑。以 CO<sub>2</sub> 激光切割机为例，整个切割装置由控制系统、运动系统、光学系统、水冷系统、气保护系统等组成，采用先进的数控模式实现多轴联动以及激光不受速度影响的等能量切割；采用性能优越的伺服电机和传动导向结构可实现在高速状态下良好的运动精度。

激光切割可应用于汽车制造、计算机、机电、金属零件和特殊材料、圆形锯片、弹簧垫片、电子机件用铜板、金属网板、钢管、电木板、铝合金薄板、石英玻璃、硅橡胶、氧化铝陶瓷片、钛合金等。使用的激光器有 YAG 激光器和 CO<sub>2</sub> 激光器。脉冲激光适用于金属材料，连续激光适用于非金属材料，后者是激光切割技术的重要应用领域。

### (3) 激光熔覆技术

激光熔覆技术是以不同的添料方式在被熔覆基体表面上经激光束辐照，使其和基体表面层同时熔化，并快速凝固后形成稀释度极低、与基体成冶金结合的熔覆层，改善基层表面的耐磨、耐蚀、耐热、抗氧化性及电气特性的工艺方法。

利用激光束的高功率密度，添加特定成分的自熔合金粉（如镍基、钴基和铁基合金等），在基材表面形成一层很薄的熔覆层，使它们以熔融状态均匀地铺展在零件表层并达到预定厚度，与微熔的基体形成良好的冶金结合，并且相互间只有很小的稀释度，在随后的快速凝固过程中，在零件表面形成与基材完全不同的、具有特殊性能的熔覆层。激光熔覆可以完全改变材料表面性能，可使价廉的材料表面获得极高的耐磨、耐蚀、耐高温等性能。

激光熔覆可达到表面改性、修复或再制造的目的，可修复材料表面的孔洞和裂纹，恢复已磨损零件的几何尺寸和性能，满足对材料表面特定性能的要求，节约大量的贵重元素。与堆焊、喷涂、电镀和气相沉积相比，激光熔覆具有稀释率小、组织致密、涂层与基体结合好等特点，在航空航天、模具及机电行业应用广泛。目前激光熔覆使用的激光器以大功率 YAG 激光器、CO<sub>2</sub> 激光器为主。

#### (4) 激光热处理（激光相变硬化、激光淬火）

激光热处理是利用高功率密度的激光束加热金属工件表面，达到表面改性（即提高工件表面硬度、耐磨性和耐腐蚀性等）的热处理。激光束可根据要求进行局部选择性硬化处理，工件应力和变形小。这项技术在汽车工业中应用广泛，如缸套、曲轴、活塞环、换向器、齿轮等零部件的激光热处理，在航空航天、机床行业和机械行业也应用广泛。我国的激光热处理应用远比国外广泛得多，目前使用的激光器以 YAG 激光器、CO<sub>2</sub> 激光器为主。

激光热处理可以对金属表面实现相变硬化（或称表面淬火、表面非晶化、表面重熔淬火）、表面合金化等表面改性处理，产生大表面淬火达不到的表面成分和组织性能。激光相变硬化是激光热处理中研究最早、最多、应用最广的工艺，适用于大多数材料和不同形状零件的不同部位，可提高零件的耐磨性和疲劳强度。经激光热处理后，铸铁表面硬度可以达到 60HRC 以上，中碳及高碳钢表面硬度可达 70HRC 以上，提高耐磨性、耐蚀性、抗氧化性等，延长工件的使用寿命。

激光退火技术是半导体加工的一种工艺，效果比常规热处理退火好得多。激光退火后，杂质的替位率可达到 98%~99%，可使多晶硅的电阻率降低 40%~50%，可大大提高集成电路的集成度，使电路元件间的间隔减小到 0.5μm。

#### (5) 激光快速成形技术

激光快速成形技术是将激光加工技术和计算机数控技术及柔性制造技术相结合而形成的，多用于模具和模型行业。目前使用的激光器多以 YAG 激光器、

CO<sub>2</sub>激光器为主。激光快速成形技术集成了激光技术、CAD/CAM 技术和材料技术的最新成果,根据零件的 CAD 模型,用激光束将光敏聚合物逐层固化,精确堆积成样件,不需要模具和刀具即可快速精确地制造形状复杂的零件。该技术已在航空航天、电子、汽车等工业领域得到广泛应用。

#### (6) 激光打孔技术

激光打孔技术具有精度高、通用性强、效率高、成本低和综合技术经济效益显著等优点,已成为现代制造领域的关键技术之一。在激光出现之前,只能用硬度较大的物质在硬度较小的物质上打孔。这样,要在硬度最大的金刚石上打孔就极其困难。激光出现后,这一类的操作既快又安全。但是激光钻出的孔是圆锥形的,而不是机械钻孔的圆柱形,这在有些地方是不方便的。

激光打孔主要应用在航空航天、汽车制造、电子仪表、化工等行业。激光打孔的迅速发展,主要体现在打孔用 YAG 激光器的输出功率已由 400W 提高到了 800~1000W。打孔峰值功率高达 30~50kW,打孔用的脉冲宽度越来越窄,重复频率越来越高。激光器输出参数的提高改善了打孔质量,提高了打孔速度,也扩大了激光打孔的应用范围。国内比较成熟的激光打孔的应用是人造金刚石和天然金刚石拉丝模的生产及钟表、仪表的宝石轴承、飞机叶片、印刷线路板等行业。目前使用的激光器以 CO<sub>2</sub> 激光器、YAG 激光器为主,也有一些准分子激光器、同位素激光器和半导体泵浦激光器。

#### (7) 激光打标技术

激光打标是利用高能量密度的激光束对工件进行局部照射,使表层材料气化或发生颜色变化的化学反应,从而留下永久性标记的一种打标方法。激光打标可以打出各种文字、符号和图案等,字符大小可以从 mm 到  $\mu\text{m}$  量级,这对产品的防伪有特殊的意义。聚焦后极细的激光束如同刀具,可将物体表面材料逐点去除。激光打标技术的先进性在于标记过程为非接触性加工,不产生机械挤压或机械应力,不会损坏被加工物品。激光束聚焦后的尺寸很小,热影响区小,加工精细,可以完成常规方法无法实现的工艺。

激光加工使用的“刀具”是聚焦后的光束,不需要额外增添其他设备和材料,只要激光器能正常工作,就可以长时间连续加工。激光打标加工速度快,成本低,由计算机自动控制,生产时不需人为干预。准分子激光打标是近年来发展起来的一项新技术,特别适用于金属打标,可实现亚微米打标,已广泛用于微电子工业和生物工程。

激光能标记何种信息,仅与计算机设计的内容相关,只要计算机设计出的图稿打标系统能够识别,那么打标机就可以将设计信息精确地还原在合适的载体上。因此激光打标软件的功能实际上很大程度上决定了激光打标系统的功能。该



项技术在各种材料和几乎所有行业得到应用，使用的激光器有YAG激光器、CO<sub>2</sub>激光器和半导体泵浦激光器。

#### (8) 激光表面强化及合金化

激光表面强化是用高功率密度的激光束加热，使工件表面薄层发生熔凝和相变，然后自激快冷形成微晶或非晶组织。激光表面合金化是用激光加热涂覆在工件表面的金属、合金或化合物，与基体金属快速发生熔凝，在工件表面形成一层新的合金层或化合物层，达到材料表面改性的目的。还可以用激光束加热基体金属及通过的气体，使之发生化学冶金反应（例如表面气相沉积），在金属表面形成所需要物相结构的薄膜，以改变工件的表面性质。激光表面强化及合金化适用于航空航天、兵器、核工业、汽车制造业中需要改善耐磨、耐腐蚀、耐高温等性能的零部件。

除了上述激光加工技术之外，已成熟的激光加工技术还包括：激光蚀刻技术、激光微调技术、激光存储技术、激光划线技术、激光清洗技术、激光强化电镀技术、激光上釉技术等。

激光蚀刻技术比传统的化学蚀刻技术工艺简单，可大幅度降低生产成本，可加工0.125~1μm宽的线，适合于超大规模集成电路的制造。激光微调技术可对指定电阻进行自动精密微调，精度可达0.01%~0.002%，比传统加工方法的精度和效率高、成本低。激光微调包括薄膜电阻（厚度0.01~0.6μm）与厚膜电阻（厚度20~50μm）的微调、电容的微调和混合集成电路的微调。

激光存储技术是利用激光来记录视频、音频、文字资料及计算机信息，是信息化时代的支撑技术之一。激光划线技术是生产集成电路的关键技术，其划线细、精度高（线宽为15~25μm，槽深为5~200μm），加工速度快（可达200mm/s），成品率可达99.5%以上。激光清洗技术的采用可大大减少加工器件的微粒污染，提高精密器件的成品率。

激光强化电镀技术可提高金属的沉积速度，速度比无激光照射快1000倍，对微型开关、精密仪器零件、微电子器件和大规模集成电路的生产和修补具有重大意义。使用该技术可使电镀层的牢固度提高100~1000倍。激光上釉技术对于材料改性很有发展前途，其成本低，容易控制和复制，有利于发展新材料。激光上釉结合火焰喷涂、等离子喷涂、离子沉积等技术，在控制组织、提高表面耐磨、耐腐蚀性能方面有着广阔的应用前景。电子材料、电磁材料和其他电气材料经激光上釉后用于测量仪表极为理想。

## 1.2 激光加工现状及发展趋势

激光技术在我国经过30多年的发展，取得了上千项科技成果，许多已用于