

# 激光焊接 切割 熔覆技术

第 **3** 版

JIGUANG HANJIE  
QIEGE  
RONGFU JISHU

李亚江 李嘉宁 高华兵 等编著



化学工业出版社

# 激光焊接 切割 熔覆技术

第 3 版

李亚江 李嘉宁 高华兵 等编著



化学工业出版社

· 北京 ·

## 图书在版编目 (CIP) 数据

激光焊接/切割/熔覆技术/李亚江等编著. —3 版.  
—北京: 化学工业出版社, 2019.10  
ISBN 978-7-122-33774-0

I. ①激… II. ①李… III. ①激光焊-基本知识②激光切割-基本知识③激光熔覆-基本知识 IV. ①TG4  
②TG174.445

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 164425 号

---

责任编辑: 周 红  
责任校对: 宋 玮

文字编辑: 张燕文  
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: 三河市航远印刷有限公司

装 订: 三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 17¼ 字数 462 千字 2019 年 10 月北京第 3 版第 1 次印刷

---

购书咨询: 010-64518888

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: 88.00 元

版权所有 违者必究

## 前言

激光加工技术是 21 世纪最具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、切割和熔覆等技术手段日益引起人们的重视，并在汽车、能源、电子、航空航天等领域得到快速发展。

激光束具有可在大气中进行焊接、切割和熔覆的特点，聚焦后的光斑既可切割、熔覆，又可完成精密焊接，热输入小，接头质量好。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。《激光焊接/切割/熔覆技术》一书受到社会各界的关注。《激光焊接/切割/熔覆技术》（第 3 版）在突出工艺特点和实用性的基础上，更新和增补了一些内容，例如增补了近年来发展较快的激光-电弧复合焊和激光选区熔化等内容，给出了新的工程应用示例，有助于扩大读者的视野，拓宽解决问题的思路。

本书可供从事激光技术研发、激光焊接-切割-熔覆和制造工程的相关技术人员、质检人员、管理人员及技术工人使用，也可供高等院校师生、科研院（所）、厂矿企业的相关人员参考。

参加本书编写的还有王娟、马群双、刘坤、魏守征、吴娜、刘鹏、马海军、蒋庆磊、夏春智、沈孝芹、黄万群、胡效东、田杰、胡庆贤、胥国祥、王泽钢等。

由于笔者水平所限，书中疏漏之处敬请读者批评指正。

编著者

2018 年 10 月

<b>第 1 章 概述</b> .....	<b>001</b>
1.1 激光加工的原理、特点与工艺 .....	001
1.1.1 激光加工的原理 .....	001
1.1.2 激光加工的特点 .....	002
1.1.3 激光加工的工艺 .....	003
1.2 激光加工技术的现状及发展趋势 .....	007
1.2.1 激光加工技术的现状 .....	007
1.2.2 激光加工技术的发展趋势 .....	008
1.2.3 存在的问题和市场展望 .....	009
<b>第 2 章 激光加工基础</b> .....	<b>010</b>
2.1 激光的物理特性 .....	010
2.1.1 激光的特点 .....	010
2.1.2 激光产生的基本原理 .....	011
2.1.3 表征激光光束质量的特征参数 .....	013
2.1.4 激光光束的输出形状 .....	015
2.2 激光器及加工系统 .....	016
2.2.1 激光器的基本组成及发展 .....	016
2.2.2 从 CO <sub>2</sub> 气体激光器到光纤激光器 .....	018
2.2.3 大功率光纤激光器及其发展 .....	029
<b>第 3 章 激光焊接</b> .....	<b>036</b>
3.1 激光焊的原理、特点及应用 .....	036
3.1.1 激光焊原理及分类 .....	036
3.1.2 激光焊熔透状态特征及焊缝形成特点 .....	042
3.1.3 激光焊的特点及应用 .....	043
3.2 激光焊设备及工艺 .....	048
3.2.1 激光焊设备及技术参数 .....	048
3.2.2 脉冲激光焊工艺特点及工艺参数 .....	052
3.2.3 连续激光焊工艺及参数 .....	054
3.2.4 激光-电弧复合焊设备及工艺模式 .....	062
3.2.5 激光钎焊工艺 .....	064
3.3 不同材料的激光焊 .....	066
3.3.1 钢的激光焊 .....	066
3.3.2 有色金属的激光焊 .....	068
3.3.3 高温合金的激光焊 .....	074
3.3.4 异种材料的激光焊 .....	075

3.4	激光-电弧复合焊	076
3.4.1	激光-电弧复合焊的原理及热源分类	076
3.4.2	激光-电弧复合焊的特点	080
3.4.3	激光与电弧的复合方式	082
3.4.4	激光-电弧复合焊参数对焊缝成形的影响	085
3.4.5	激光-电弧复合焊的应用	094
3.5	激光焊的应用示例	096
3.5.1	42CrMo 钢锥齿轮轴的窄间隙激光焊	096
3.5.2	冷轧钢板与高强度镀锌钢板车身的 CO <sub>2</sub> 激光拼焊	097
3.5.3	铝/钢异种金属的激光-MIG 复合焊	098
3.5.4	大厚度不锈钢板的激光焊	099
3.5.5	不锈钢超薄板的脉冲激光焊	101
3.5.6	管线钢的激光焊	101
3.5.7	汽车高强钢板光纤激光焊	103
3.5.8	大厚度板复合热源深熔焊接	104
3.5.9	有色金属激光-电弧复合焊	105

## 第 4 章 激光切割 107

4.1	激光切割的原理、特点及应用	107
4.1.1	激光切割的原理及分类	107
4.1.2	激光切割的特点	109
4.1.3	激光切割的应用范围	111
4.1.4	工程材料的激光切割	112
4.2	激光切割设备	114
4.2.1	激光切割设备的组成	115
4.2.2	激光切割用的激光器	116
4.2.3	激光切割的割炬	118
4.2.4	数控激光切割机和激光切割机器人	121
4.2.5	激光切割设备的技术参数	123
4.3	激光切割工艺	125
4.3.1	激光切割的工艺参数	125
4.3.2	激光切割的操作程序及关键技术	133
4.3.3	激光切割的质量及控制	136
4.4	激光切割的应用	142
4.4.1	钢铁材料的激光切割	142
4.4.2	有色金属的激光切割	151
4.4.3	非金属材料的激光切割	157
4.4.4	汽车桥壳的激光切割	158
4.4.5	水导引激光切割	159

## 第 5 章 激光熔覆和选区激光熔化 161

5.1	激光熔覆的原理与特点	161
5.1.1	激光熔覆的原理	161
5.1.2	激光熔覆的分类	162
5.1.3	激光熔覆的特点及应用	164

5.1.4	激光熔覆的现状及其存在问题	167
5.2	激光熔覆设备与材料	168
5.2.1	激光熔覆设备	168
5.2.2	激光熔覆材料	170
5.2.3	激光熔覆材料的设计和选用	175
5.2.4	熔覆材料的添加方式	178
5.3	激光熔覆工艺	179
5.3.1	激光熔覆的工艺概述	179
5.3.2	激光熔覆的工艺参数	180
5.3.3	激光复合熔覆技术	184
5.3.4	激光熔覆层的显微组织特征	185
5.3.5	激光熔覆层的性能	187
5.3.6	激光熔覆层的耐磨性评定	191
5.3.7	激光熔覆层的应力状态	191
5.4	选区激光熔化	193
5.4.1	选区激光熔化简介	193
5.4.2	选区激光熔化原理	194
5.4.3	选区激光熔化设备及工艺	195
5.4.4	选区激光熔化技术的研究进展	198
5.5	激光熔覆的应用	199
5.5.1	钢铁材料的激光熔覆	201
5.5.2	钢轧辊的激光熔覆	201
5.5.3	轴类件的激光熔覆	205
5.5.4	钛合金的激光熔覆	209
5.5.5	液压支架高强钢关键件的激光熔覆	214
5.5.6	宽束激光熔覆 Ni60+ WC 复合层	224
5.5.7	选区激光熔化制备 18Ni300 钢模具	228
5.5.8	极端条件下的激光熔覆	239
<b>第 6 章 激光质量监测及安全防护</b>		<b>241</b>
6.1	激光器的光束质量及聚焦质量	241
6.1.1	激光器的光束质量	241
6.1.2	光束质量对聚焦的影响	245
6.1.3	引起激光束焦点位置波动的因素	248
6.2	激光与材料的相互作用	252
6.2.1	材料吸收激光的规律及影响因素	252
6.2.2	激光作用下材料的物态变化	256
6.3	激光加工过程监测	257
6.3.1	激光与材料作用过程的监测	257
6.3.2	激光束焦点位置检测与控制	261
6.4	激光加工安全与防护	266
6.4.1	激光辐射对人体的危害	267
6.4.2	激光危害的工程控制	268
6.4.3	激光的安全防护	268
<b>参考文献</b>		<b>269</b>

# 第 1 章

## 概 述

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、特点与工艺

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, 实现自动化和无污染及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、汽化等现象。

在不同功率密度的激光束的照射下, 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、汽化、形成小孔以及产生光致等离子体等。图 1.1 所示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。

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



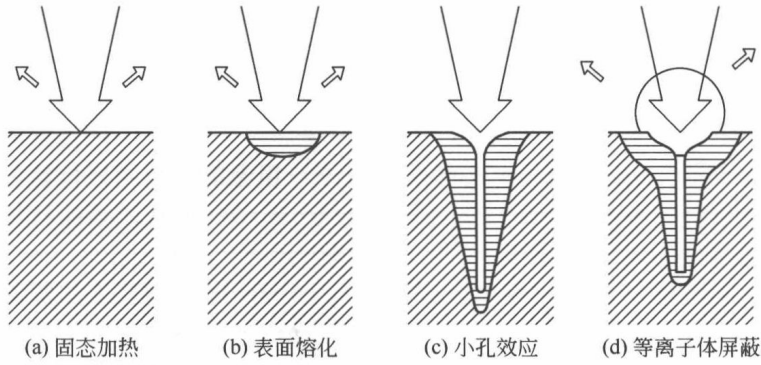


图 1.1 金属材料表面在激光辐射作用下的几种物态变化

升高，但维持固相不变，可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，可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汽化，在汽化膨胀压力作用下，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，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，用于采用脉冲激光进行打孔、冲击硬化等加工。

激光加工是利用高功率密度的激光束照射工件，使材料熔化、汽化而进行穿孔、切割和焊接等的特种加工。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，应用范围随之扩大。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。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、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）的电磁辐射束的一种设备。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  $10000^\circ\text{C}$  以上），任何材料都会瞬时熔化、汽化。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、 $\text{CO}_2$  气体激光器和光纤激光器。由于  $\text{CO}_2$  激光器具有结构简单、输出功率大和能量转换效率高等优点，可广泛用于材料的激光加工。

## 1.1.2 激光加工的特点

世界上第一个激光束于 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  $10^6 \text{ W/cm}^2$ ，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1~8kW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,适于焊接厚度为0.5~6mm。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25kW,可对厚度为2mm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。因二极管的小体积、长寿命和高效率,人们制得了半导体二极管激光器。正是因为如此多不同类型的激光器的出现,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、激光目标指示器、激光雷达等。

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,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。可根据计算机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0.1mm。效果一致:保证同一批次工件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0.1~0.2mm。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,而且激光加工可完全避免材料冲剪时形成的塌边,可以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,激光加工更加适宜。
- ⑧ 节省材料:激光加工采用计算机编程,可将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 激光加工的工艺

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

激光焊接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,已成功应用于微小型零件焊接中。大功率 $\text{CO}_2$ 激光器及大功率光纤激光器的出现,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、汽车制造、钢铁等工业部门获得了日益广泛的应用。

激光焊接可以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、密封继电器等各种不允许焊接变形和污染的器件以及密封器件。

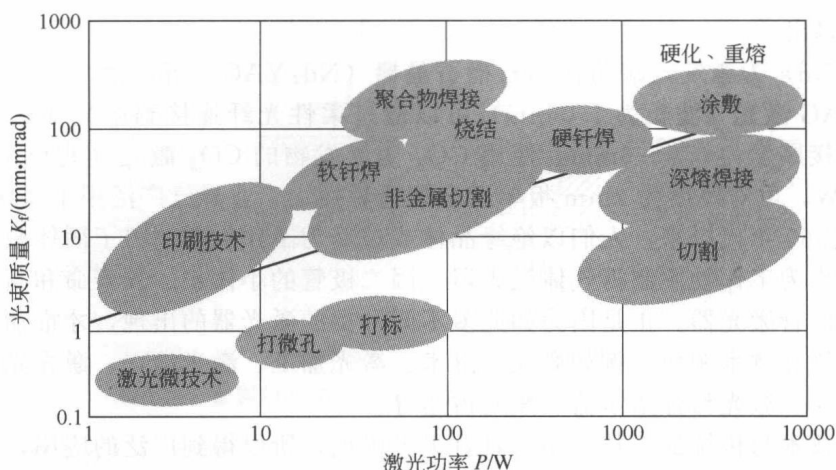


图 1.2 材料加工方式对激光功率和光束质量的要求

激光焊接技术具有熔池净化效应，能获得纯净的焊缝金属，适用于同种和异种金属材料间的焊接。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，例如集成电路引线、钟表游丝、显像管电子枪组装等，由于采用了激光焊接，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，以瞬间高温使被加工材料熔化或汽化。

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，将熔化或汽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、高度柔性（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为了人们理想中追求的“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动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、氧化钼陶瓷片、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

激光熔覆指以不同的添料方式在被熔覆基体表面上经激光束辐照使熔覆材料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敷层,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、具有特殊性能的功能熔覆材料层。激光熔覆可以完全改变材料表面性能,可使低成本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,节约大量的贵金属。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、熔覆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、激光退火)

利用高功率密度的激光束加热金属工件表面,实现表面改性(即提高工件表面硬度、耐磨性和耐腐蚀性等)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,例如缸套、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,中碳钢及高碳钢表面硬度可达 70HRC 以上,提高了材料的耐磨性、耐蚀性、抗氧化性等,延长了工件的使用寿命。

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 0.5 $\mu$ m。

### (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。目前使用的激光器以 YAG 激光器、CO<sub>2</sub> 激光器和光纤激光器为主。激光快速成形技术集成了激光技术、CAD/CAM 技术、控制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材料逐层固化,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、运载车辆等工业领域得到了广泛应用。

### (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。这样要在硬度很高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 800W 甚至 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在人造金刚石和天然金刚石拉丝模的生产, 以及钟表、仪表的宝石轴承与飞机叶片、印制线路板等行业中。目前使用的激光器以 CO<sub>2</sub> 激光器、YAG 激光器为主, 也有应用准分子激光器、同位素激光器和半导体泵浦激光器的。

#### (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, 使表层材料汽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, 字符大小可以从毫米量级到微米量级, 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。

激光打标使用的“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。

#### (9) 其他

除了上述激光加工技术外, 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(厚度为 0.01~0.6μm)与厚膜电阻(厚度为 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。改进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而言有发展前途，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、提高表面耐磨性和耐腐蚀性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 激光加工技术的现状及发展趋势

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。例如激光毛化纤技术正在宝钢、本钢等大型钢厂推广，将改变我国汽车覆盖件的钢板依赖进口的状态；激光标记机与激光焊接装备的质量、功能、价格符合国内市场的需求，市场占有率达 80% 以上。

### 1.2.1 激光加工技术的现状

激光加工是国外激光应用中最大的项目，也是对传统产业改造的重要手段，主要是 1~10kW 级 CO<sub>2</sub> 激光器、百瓦到千瓦级 YAG 激光器和大功率光纤激光器，实现对各种材料的切割、焊接、打孔、熔覆和表面处理等。据近年来的激光市场评述和预测，激光器的应用占第一位的是材料加工领域，医用激光器是国外第二大应用领域。

激光加工应用领域中，CO<sub>2</sub> 激光器以切割和焊接应用最广泛，分别占到 70% 和 20%，表面处理不到 10%。YAG 激光器的应用是以焊接、标记（50%）和切割（15%）为主。在美国和欧洲 CO<sub>2</sub> 激光器占到了 70%~80%。我国激光加工中以切割为主的占 10%，其中 98% 以上的 CO<sub>2</sub> 激光器功率在 1.5~3kW 范围；以表面处理为主的约占 15%，大多数是进行激光表面处理汽车发动机的气缸套。激光加工技术的经济性和社会效益都很高，有很大的市场前景。

在汽车工业中，激光加工技术充分发挥了其先进、快速、灵活的加工特点。例如在汽车样机和小批量生产中大量使用三维激光切割机，不仅节省了样板及工装设备，还大大缩短了生产周期；激光束在高硬度材料和复杂而弯曲的表面打小孔，速度快而不产生破损；激光焊接在汽车工业中已成为标准工艺，日本丰田公司已将激光技术用于车身面板的焊接，将不同厚度和不同表面涂敷的金属板焊接在一起，然后再进行冲压。虽然激光表面处理在国外不如焊接和切割普遍，但在汽车工业中仍应用广泛，如缸套、曲轴、活塞环、换向器、齿轮等零部件的表面处理。在工业发达国家，激光加工技术和计算机数控技术及柔性制造技术相结合，派生出激光快速成形技术。该项技术不仅可以快速制造模型，而且还可以直接由金属粉末熔融，3D 打印制造出金属模具。

图 1.3 所示为在车身总装上用激光焊取代电阻焊的工艺，使汽车设计可以自由地发挥其想象力和创造性，设计出独特风格的车型。同时激光焊接技术较之电阻点焊具有更高的效率、更优异的接头性能、更少的材料消耗等优势。

由于激光加工技术的优势，欧洲所有的汽车制造企业都无一例外地大量采用了激光加工技术。例如，德国大众公司曾一次性订购了 260 台 4kW 大功率 YAG 激光器，主要用于车身的焊接和零部件加工。德国博世公司的生产线上安装了不同类别的大功率激光加工设备 400 多台套，主要用于汽车零部件的加工和焊接。激光加工技术在汽车制造中应用的广度和深度已经成为汽车工业先进性的重要标志。

在航空航天领域，20 世纪 70 年代之前，由于没有高功率连续激光器，主要是脉冲激光焊接应用于小型精密零件的点焊，或由单个焊点搭接而成的焊缝。20 世纪 70 年代以后，随着数千瓦的 CO<sub>2</sub> 激光焊接技术的研发，情况发生了根本性的变化。几毫米厚的钢板能够一

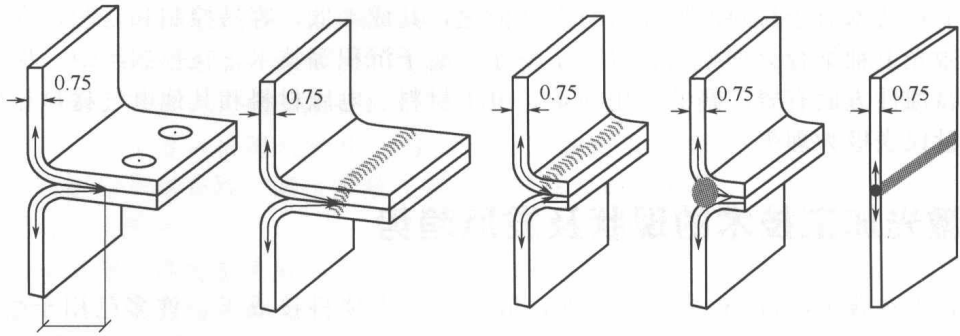


图 1.3 车身总装上用激光焊取代电阻焊工艺

次性焊透，所得焊缝与电子束焊接相似，显示了高功率激光焊接的巨大潜力。例如，空客 A380 之所以能大幅度减轻飞机重量、减少油耗、降低运营成本的主要原因，就是将激光焊接技术应用于机身、机翼内隔板与加强筋的连接（图 1.4），取代原有的铆接工艺，被德国宇航界称为航空制造业中的一大技术革命。

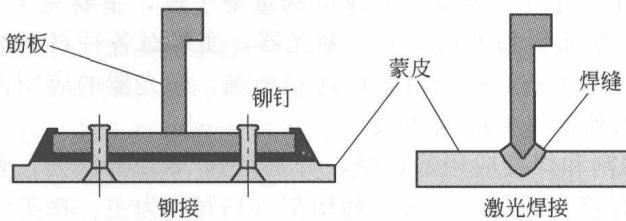


图 1.4 铆接和激光焊接结构对比

21 世纪以来，YAG 激光器在焊接、切割、打孔和标记等方面发挥了越来越大的作用。通常认为 YAG 激光器切割可以得到良好的切割质量和高的切割精度，但在切割速度上受到限制。随着 YAG 激光器输出功率和光束质量的提高，YAG 激光器已挤进千瓦级 CO<sub>2</sub> 激光器切割市场。YAG 激光器特别适合

不允许热变形和焊接污染的微型器件，如锂电池、心脏起搏器、密封继电器等。

光纤激光器是近年来发展起来的一种新型激光器件，也是目前国内外光电信息领域研究的热点技术之一。因在光学模式、使用寿命等方面的优点，光纤激光器已成为新一代固体激光器的代表，在国内外得到了广泛研究和迅速发展，有着广阔的应用前景。

## 1.2.2 激光加工技术的发展趋势

激光是 20 世纪的重大发明之一，具有巨大的技术潜力。专家们认为，现在是电子技术的全盛时期，其主角是计算机，下一代将是光技术时代，其主角是激光。激光因具有单色性、相干性和平行性三大特点，特别适用于材料加工。激光加工是激光应用最有发展前途的领域，国外已开发出 20 多种激光加工技术。激光的空间控制性和时间控制性很好，对加工对象的材质、形状、尺寸和加工环境的自由度都很大，特别适用于自动化加工。激光加工系统与计算机数控技术相结合可构成高效自动化加工设备，为优质、高效和低成本的生产开辟了广阔的前景。

激光加工技术是绿色制造技术的重要支撑技术之一，符合国家可持续发展战略。激光加工技术的发展趋势主要体现在以下几个方面。

① 在材料研发方面，针对激光焊接、熔覆的材料种类，分别研制不同材料的激光焊接和熔覆材料。

② 在工艺控制方面，对于激光焊接、熔覆工艺而言，其发展趋势是开发基于激光焊接、熔覆的在线监控系统，对激光焊接、熔覆过程进行实时监控。研发与激光焊接、熔覆相配套的复合工艺（如激光-电弧复合等），提高激光焊接、熔覆的效率。

③ 在加工系统智能化与机器人化方面，系统集成不仅是加工本身，并且带有实时检测、

反馈处理,随着专家系统的建立,加工系统智能化已成为必然的发展趋势。为了提高激光焊接、切割、熔覆的工作效率,研发低成本智能化机器人并逐步得到推广应用。

④ 新一代工业激光器研究,目前处在技术上的更新时期,其标志是二极管泵浦全固态激光器的发展及应用。

激光加工成套设备包括激光发生器、数控系统、加工机床等,这构成了激光加工的柔性制造系统。目前激光加工技术研发的重点可以归纳为以下几方面。

① 数控化和综合化。把激光器与计算机数控技术、先进的光学系统以及高精度和自动化的工件定位相结合,形成研制和生产加工中心,已成为激光加工技术发展的趋势。

② 小型化和组合化。国外已把激光切割和模具冲压两种加工方法组合在一台机床上,制成激光冲床,它兼有激光切割的多功能性和冲压加工的高速高效的特点,可完成切割复杂外形、打孔、打标、划线等加工。

③ 高频度和高可靠性。目前国外 YAG 激光器的重复频率已达 2000 次/s,二极管阵列泵浦的 YAG 激光器的平均维修时间已从原来的几百小时提高到 (1~2) 万小时。

④ 采用激光激光器进行金属加工。这是国外激光加工的一个新课题。激光激光器能发射出波长 157~350nm 的紫外激光,大多数金属对这种激光的反射率很低,吸收率相应很高。因此这种激光器在金属加工领域有很大的应用价值。

### 1.2.3 存在的问题和市场展望

#### (1) 存在的主要问题

① 科研成果转化为生产力的能力差,许多有市场前景的激光加工技术成果停留在实验室的样机阶段。

② 激光加工系统的核心部件激光器的品种少、可靠性差。国外不仅二极管泵浦的全固态激光器已用于生产过程中,而且二极管激光器也被应用,而我国二极管泵浦的全固态激光器还处在研发阶段。

③ 对精细激光加工技术的研发较为薄弱,对紫外波激光进行加工的研究进行得更少。

④ 激光加工装备的可靠性、安全性、可维修性、配套性较差,仍难以满足大批量工业生产的需要。

#### (2) 市场展望

激光加工技术极大地提升了传统制造业的水平,带来了产品设计、制造工艺和生产观念的巨大变革,引发了一场制造技术的革命。与国际先进的激光加工系统相比,我国的激光加工系统存在较大的差距(数据统计表明,仅占全球销售额的 2% 左右)。主要表现为高档激光加工系统少,主导激光器不过关,微细激光加工装备缺口较大。

我国激光加工装备的生产企业正在稳步发展,国内激光应用市场有很大发展空间。今后若干年内激光加工的生产企业将有更快速的发展,这主要得益于以下几个方面。

① 国家高度重视,各级政府部门积极关注、规划、立项,多方面资金正在注入,促进了企业产品的自主创新、技术升级。

② 国内各类制造业接受了激光加工技术,可使他们的产品增加技术含量,加快产品更新换代。采用先进的激光加工技术可达到“敏捷制造”的水平,满足市场对个性化产品的要求。

③ 逐步形成了激光零部件配套企业的产业群体,各类具有特色的激光加工系统制造商逐步建立。目前已形成四个激光加工装备制造的产业带,主要分布在华中、珠江三角洲、长江三角洲和京津环渤海经济发达地区。

④ 国内主导激光器的研发已进入市场应用阶段,如大功率轴流 CO<sub>2</sub> 激光器、中小功率金属腔射频 CO<sub>2</sub> 激光器、半导体泵浦全固态激光器、光纤激光器,以及倍频 DPL、大功率二极管模块等,已进入产品化阶段,正蓄势待发,为国产激光加工装备的应用创造了条件。



# 第2章

## 激光加工基础

激光是利用原子或分子受激辐射的原理，使工作物质受激发而产生的一种光辐射。同一激光束内所有的光子频率相同、相位一致、偏振与传播方向一致。因此，激光是单色性好、方向性强、亮度极高的相干光辐射。激光加工技术是集光、机、电为一体的系统工程，同时与物理、材料、机械、自动化等多个学科交叉，是科技发展的前沿领域之一。激光技术及装备近年来发展很快，日益受到世界各国越来越密切的重视。

### 2.1 激光的物理特性

#### 2.1.1 激光的特点

激光作为相干光，具有多种特性。

##### (1) 单色性好

光的本质是一种电磁波辐射。对于电磁波辐射，相干长度越长，光谱线宽度越窄，其颜色越单纯，即光的单色性越好。以氦氖激光器为例，产生的激光相干长度约为  $4 \times 10^4 \text{ m}$ 。在激光出现之前，最好的单色光源是氦灯，它产生的光辐射相干长度约  $0.78 \text{ m}$ 。可见激光是世界上发光颜色最单纯的光源。

##### (2) 亮度高

高亮度是激光的又一突出特点。一般地，将单位发光面积  $\Delta S$ 、单位光辐射宽度  $\Delta \nu$ 、发散角  $\theta$  发出的光辐射强度定义为光源的单色亮度  $B_\lambda$ 。

$$B_\lambda = \frac{P}{\Delta S \Delta \nu \theta^2} \quad (2.1)$$