



“十三五”国家重点出版物
出版规划项目

中国制造
2025



复合材料激光增材制造 技术及应用

李嘉宁 巩水利 著



化学工业出版社



“十三五”国家重点出版物
出版规划项目



复合材料激光增材制造 技术及应用

李嘉宁 巩水利 著



化学工业出版社

· 北京 ·

复合材料激光增材制造技术有广阔的应用前景,具有非常显著的经济及社会效益。本书针对近年来广受人们关注的复合材料的激光增材制造问题,对其制造原理、工艺特性、成形机理及微观组织等做了系统阐述,并给出了相关的应用示例,可指导相关理论研究及实际工业生产。本书内容反映了近年来复合材料激光增材制造技术的发展趋势,对推动复合材料激光增材制造的应用具有重要意义。

本书可供从事材料开发及激光增材制造领域的相关工程技术人员使用,也可供高等院校相关专业师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

复合材料激光增材制造技术及应用/李嘉宁,巩水利著. —北京:化学工业出版社,2019.9

“中国制造2025”出版工程

ISBN 978-7-122-34729-9

I. ①复… II. ①李…②巩… III. ①激光技术-应用-复合材料-制造
IV. ①TB33

中国版本图书馆CIP数据核字(2019)第122839号

责任编辑:曾越

装帧设计:尹琳琳

责任校对:王静

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:三河市延风印装有限公司

710mm×1000mm 1/16 印张18 $\frac{3}{4}$ 字数353千字 2019年10月北京第1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:89.00元

版权所有 违者必究

序

制造业是国民经济的主体，是立国之本、兴国之器、强国之基。近十年来，我国制造业持续快速发展，综合实力不断增强，国际地位得到大幅提升，已成为世界制造业规模最大的国家。但我国仍处于工业化进程中，大而不强的问题突出，与先进国家相比还有较大差距。为解决制造业大而不强、自主创新能力弱、关键核心技术与高端装备对外依存度高等制约我国发展的问题，国务院于 2015 年 5 月 8 日发布了“中国制造 2025”国家规划。随后，工信部发布了“中国制造 2025”规划，提出了我国制造业“三步走”的强国发展战略及 2025 年的奋斗目标、指导方针和战略路线，制定了九大战略任务、十大重点发展领域。2016 年 8 月 19 日，工信部、国家发展改革委、科技部、财政部四部委联合发布了“中国制造 2025”制造业创新中心、工业强基、绿色制造、智能制造和高端装备创新五大工程实施指南。

为了响应党中央、国务院做出的建设制造强国的重大战略部署，各地政府、企业、科研部门都在进行积极的探索和部署。加快推动新一代信息技术与制造技术融合发展，推动我国制造模式从“中国制造”向“中国智造”转变，加快实现我国制造业由大变强，正成为我们新的历史使命。当前，信息革命进程持续快速演进，物联网、云计算、大数据、人工智能等技术广泛渗透于经济社会各个领域，信息经济繁荣程度成为国家实力的重要标志。增材制造（3D 打印）、机器人与智能制造、控制和信息化技术、人工智能等领域技术不断取得重大突破，推动传统工业体系分化变革，并将重塑制造业国际分工格局。制造技术与互联网等信息技术融合发展，成为新一轮科技革命和产业变革的重大趋势和主要特征。在这种中国制造业大发展、大变革背景之下，化学工业出版社主动顺应技术和产业发展趋势，组织出版《“中国制造 2025”出版工程》丛书可谓勇于引领、恰逢其时。

《“中国制造 2025”出版工程》丛书是紧紧围绕国务院发布的实施制造强国战略的第一个十年的行动纲领——“中国制造 2025”的一套高水平、原创性强的学术专著。丛书立足智能制造及装备、控制及信息技术两大领域，涵盖了物联网、大数

据、3D 打印、机器人、智能装备、工业网络安全、知识自动化、人工智能等一系列核心技术。丛书的选题策划紧密结合“中国制造 2025”规划及 11 个配套实施指南、行动计划或专项规划，每个分册针对各个领域的一些核心技术组织内容，集中体现了国内制造业领域的技术发展成果，旨在加强先进技术的研发、推广和应用，为“中国制造 2025”行动纲领的落地生根提供了有针对性的方向引导和系统性的技术参考。

这套书集中体现以下几大特点：

首先，丛书内容都力求原创，以网络化、智能化技术为核心，汇集了许多前沿科技，反映了国内外最新的一些技术成果，尤其使国内的相关原创性科技成果得到了体现。这些图书中，包含了获得国家与省部级诸多科技奖励的许多新技术，因此，图书的出版对新技术的推广应用很有帮助！这些内容不仅为技术人员解决实际问题，也为研究提供新方向、拓展新思路。

其次，丛书各分册在介绍相应专业领域的新技术、新理论和新方法的同时，优先介绍有应用前景的新技术及其推广应用的范例，以促进优秀科研成果向产业的转化。

丛书由我国控制工程专家孙优贤院士牵头并担任编委会主任，吴澄、王天然、郑南宁等多位院士参与策划组织工作，众多长江学者、杰青、优青等中青年学者参与具体的编写工作，具有较高的学术水平与编写质量。

相信本套丛书的出版对推动“中国制造 2025”国家重要战略规划的实施具有积极的意义，可以有效促进我国智能制造技术的研发和创新，推动装备制造业的技术转型和升级，提高产品的设计能力和技术水平，从而多角度地提升中国制造业的核心竞争力。

中国工程院院士

潘重锦

前言

先进复合材料的研究开发是多学科交叉融合的结果,激光增材制造融合计算机辅助设计、高能束流加工及材料快速成形等技术,以数字化模型为基础,通过软件与数控系统将特制材料逐层堆积固化制造出实体产品。激光增材制造先进复合材料因具有优异的综合性能而成为设计、制造高技术装备所不可缺少的材料,主要应用于高性能舰船、航空航天、核工业、电子、能源等工业领域。

激光增材制造先进复合材料的研发是发展高新技术的重要基础,该类复合材料性能稳定性问题是工业生产中经常遇到的,有时会延缓甚至阻碍整个生产进展。为适应现代化制造工业的发展需要,实现激光增材制造材料微观组织与性能一体化精准调控,进一步改进激光增材制造复合材料的质量已非常重要。

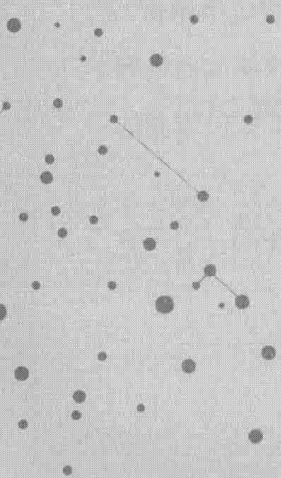
本书注重先进性、新颖性与实用性,对复合材料激光增材制造技术的发展及应用进行介绍,全书共7章:第1章介绍激光加工与增材制造技术的基本原理与发展情况;第2章介绍激光增材制造工艺与装备;第3章介绍复合材料激光熔覆层微观-宏观界面的结构、演变机理、结合机制及性能;第4~6章针对近年来广受人们关注的先进材料,如金属基/陶瓷复合材料、非晶-纳米化复合材料、金属元素改性复合材料等的激光制造问题进行介绍;第7章给出一些激光增材复合材料的应用示例,用于指导相关理论研究及实际工业生产。本书力求突出先进性、新颖性与实用性等特色,为解决复合材料激光增材制造过程中的疑难问题及保证产品质量提供重要的技术资料 and 参考数据。

本书可供从事材料开发及激光增材制造领域的相关工程技术人员使用,也可供高等院校相关专业师生阅读参考。

本书由李嘉宁、巩水利撰写，在书稿写作过程中戚文军、马群双、田杰、单飞虎提供了帮助，在此表示感谢。

由于笔者水平有限，书中不足之处在所难免，敬请读者批评指正。

著 者



1 第1章 激光加工与增材制造技术

- 1.1 激光加工的原理与特点 / 2
 - 1.1.1 激光加工原理 / 2
 - 1.1.2 激光加工特点 / 3
 - 1.1.3 激光加工工艺 / 4
- 1.2 增材制造技术概述 / 10
 - 1.2.1 增材制造技术基本概念 / 10
 - 1.2.2 增材制造技术发展现状 / 11
 - 1.2.3 增材制造技术发展趋势 / 13
- 参考文献 / 14

15 第2章 激光增材制造工艺及装备

- 2.1 增材制造工艺 / 16
- 2.2 材料的添加方式 / 20
 - 2.2.1 预置送粉 / 20
 - 2.2.2 同步送粉 / 21
 - 2.2.3 丝材送给 / 29
- 2.3 激光的物理特性 / 31
 - 2.3.1 激光的特点 / 31
 - 2.3.2 激光产生原理 / 32
 - 2.3.3 激光光束质量 / 35
 - 2.3.4 激光光束形状 / 38
- 2.4 激光器 / 39
 - 2.4.1 激光器的基本组成 / 39
 - 2.4.2 CO₂ 气体激光器 / 42
 - 2.4.3 YAG 固体激光器 / 48
 - 2.4.4 光纤激光器 / 51
- 2.5 数控激光加工平台及机器人 / 55

- 2.6 激光选区熔化设备及工艺 / 62
 - 2.6.1 激光选区熔化设备 / 62
 - 2.6.2 激光选区熔化工艺 / 63
 - 2.6.3 激光选区熔化材料 / 67
- 2.7 模具钢激光选区熔化成形 / 69
 - 2.7.1 SLM 孔隙形成原因 / 69
 - 2.7.2 SLM 成形 18Ni300 合金制备件 / 73
 - 2.7.3 SLM 成形 H13 合金制备件 / 77
- 参考文献 / 81

第 3 章 复合材料激光熔覆层微观-宏观界面

- 3.1 陶瓷相/ γ -Ni 熔覆层微观界面结构及演变机理 / 84
 - 3.1.1 带核共晶组织微观界面结构 / 84
 - 3.1.2 激光能量密度对带核共晶组织微观界面的影响 / 86
 - 3.1.3 带核共晶组织微观界面演变机理 / 92
- 3.2 Q550 钢/镍基熔覆层宏观界面结合机制 / 94
 - 3.2.1 宏观界面显微组织及元素分布 / 94
 - 3.2.2 熔覆层/基体界面结构演变机理 / 96
- 3.3 Q550 钢/宽束熔覆层宏观界面剪切强度及断裂特征 / 98
 - 3.3.1 宽束熔覆层界面剪切试验 / 99
 - 3.3.2 宽束激光工艺参数对熔覆层剪切强度的影响 / 102
 - 3.3.3 宽束熔覆层剪切断面形貌及断裂机制 / 104
- 参考文献 / 112

第 4 章 激光熔覆金属基/陶瓷复合材料

- 4.1 激光熔覆材料 / 115
 - 4.1.1 激光熔覆材料的分类 / 115
 - 4.1.2 激光熔覆用粉末 / 120
 - 4.1.3 激光熔覆用丝材 / 131
- 4.2 Ti-Al/陶瓷复合材料的设计 / 135
 - 4.2.1 组织特征 / 136
 - 4.2.2 温度场分布 / 141
 - 4.2.3 工艺参数的影响 / 143
 - 4.2.4 氮气环境中 Ti-Al/陶瓷的组织性能 / 148

- 4.2.5 稀土氧化物对 Ti-Al/陶瓷的影响 / 153
- 4.3 Fe₃Al/陶瓷复合材料的设计 / 156
 - 4.3.1 组织特征 / 156
 - 4.3.2 微观分析 / 160
 - 4.3.3 耐磨性评价 / 165
- 参考文献 / 167

169 第 5 章 激光熔覆非晶-纳米化复合材料

- 5.1 非晶化材料 / 170
 - 5.1.1 非晶化原理 / 171
 - 5.1.2 材料及工艺影响 / 173
 - 5.1.3 非晶化材料发展方向 / 177
- 5.2 纳米晶化材料 / 179
 - 5.2.1 纳米晶化原理 / 180
 - 5.2.2 陶瓷与稀土氧化物的影响 / 181
 - 5.2.3 纳米晶化材料缺陷 / 184
- 5.3 非晶-纳米晶相相互作用 / 187
 - 5.3.1 相互作用机理 / 187
 - 5.3.2 磨损形态 / 189
- 5.4 非晶-纳米化复合材料的设计 / 193
 - 5.4.1 非晶包覆纳米晶 / 193
 - 5.4.2 碳纳米管的使用 / 196
 - 5.4.3 多物相混合作用分析 / 200
- 参考文献 / 205

207 第 6 章 金属元素激光改性复合材料

- 6.1 Cu 改性复合材料 / 208
 - 6.1.1 Cu 对复合材料晶体生长形态的影响 / 208
 - 6.1.2 Cu 对复合材料相组成的影响 / 211
 - 6.1.3 Y₂O₃ 对 Cu 改性复合涂层组织结构的影响 / 214
 - 6.1.4 Cu 对复合材料纳米晶的催生 / 218
 - 6.1.5 Cu 改性复合材料的非晶化 / 220
 - 6.1.6 Cu 改性复合材料的组织性能 / 222
- 6.2 Zn 改性复合材料 / 225
- 6.3 Sb 改性复合材料 / 227

6.3.1 Sb 改性纯 Co 基复合材料 / 228

6.3.2 Sb 改性 Co 基冰化复合材料 / 234

6.3.3 含 Ta 陶瓷改性复合材料 / 238

参考文献 / 246

248 第 7 章 激光熔覆及增材制造技术的应用

7.1 模具激光熔覆增材 / 249

7.2 航空结构件激光增材制造 / 258

7.3 镁合金的激光熔覆 / 263

7.4 镍基高温合金的激光熔覆 / 267

7.5 钢轧辊的激光熔覆增材 / 272

7.6 汽车覆盖件的激光熔覆 / 277

7.7 数控刀具的激光熔覆 / 284

参考文献 / 286

287 索引



第1章

激光加工与 增材制造技术

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, 产生了巨大的经济效益和社会效益。

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, 其优点是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。

1.1.1 激光加工原理

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、切口从而进行连接、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的照射下, 材料表面区域发生各种不同的变化, 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。

当激光功率密度小于 10^4 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 W/cm^2 数量级时, 材料表面在激光束辐射作用下, 激光热源中心加热温度达到金属沸点, 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^[1]。

当激光功率密度大于 10^7 W/cm^2 数量级时, 光致等离子体将逆着激光束入射方向传播, 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。

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 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, 极大提高了激光加工的自动化水平, 扩大了使用范围。

激光加工设备可解释成将电能、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。由于激光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。

激光加工设备由四大部分组成, 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°C 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热效应对材料进行焊接、打孔和切割的。用于加工的激光器主要是 YAG 固体激光器和 CO_2 气体激光器。

1.1.2 激光加工特点

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。

20 世纪 60 年代至 70 年代, 电子束、离子束 (含等离子体)、激光束开始进入工业领域、表面处理领域, 引发了全世界科学家和工程师们的广泛兴趣, 各国政府纷纷投入巨资进行开发性研究, 从而推进了表面处理技术的突破性进展。20 世纪 90 年代形成了新的系统表面工程技术, 出现了表面工程学, 极大地推动了各行各业科学技术的进步, 继而加速了表面工程技术本身的发展。

使用钕 (Nd) 为激发元素的钕铝石榴石晶棒 (Nd: YAG) 可产生 $1 \sim 8 \text{ kW}$ 的连续单一波长光束。YAG 激光 (波长为 $1.06 \mu\text{m}$) 可通过柔

性光纤连接到激光加工头,设备布局灵活,适用焊接厚度 $0.5\sim 6\text{mm}$;使用 CO_2 为激发元素的 CO_2 激光(波长 $10.6\mu\text{m}$),输出能量达 25kW ,可对厚度 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。因二极管的体积小、寿命长、效率高,人们制得了半导体二极管激光器。

激光加工技术与传统加工技术相比具有很多优点,尤其适合新产品的开发。一旦产品图纸形成即可立刻进行激光加工,可在最短时间内得到新产品实物。

激光加工主要特点如下。

① 光点小,能量集中,所加工材料的热影响区相对较小;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,且激光切割速度与线切割速度相比要快很多。

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产生机械应力;精确细致,加工精度可达 0.1mm ;效果一致,保证同一批次的加工效果几乎完全一致。

⑤ 切割缝细小,激光切割的割缝宽度一般为 $0.1\sim 0.2\text{mm}$;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,引发材料的变形幅度也非常小。

⑥ 适合大件产品加工,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所形成的塌边,可以大幅度地降低企业生产成本,提高产品的档次。

⑦ 成本低廉,不受加工数量限制,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套裁,从而最大限度提高材料的利用率,大大降低材料的加工成本。

1.1.3 激光加工工艺

从材料传统加工方面来看,激光加工工艺包括切割、焊接、表面处

理、熔覆、打孔（标）、划线等。不同材料的加工方式对激光制造系统的激光功率和光束质量要求如图 1.1 所示。

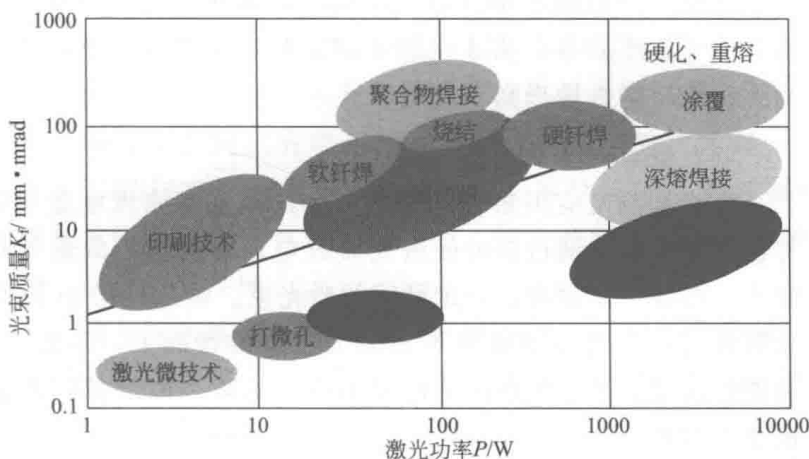


图 1.1 不同材料的加工方式对激光功率和光束质量的要求

(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，形成特定熔池。激光技术因其独特优点，已成功应用于微小型零件的焊接中。大功率 YAG 激光器的出现，开辟了激光焊接的新领域。以小孔效应为基础的深熔焊，在机械、汽车、钢铁等领域获得了日益广泛的应用。激光焊接可焊接难以接近的部位，施行非接触远距离焊接，具有很大的灵活性。激光束易实现按时间与空间分光，能进行多光束同时加工，为更精密的焊接提供了条件。例如，激光焊接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的焊接。

激光焊接技术具有熔池净化效应，能净化焊缝金属，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，适用于高熔点、高反射率、高热导率和物理特性相差很大的金属材料焊接。

激光焊接主要优点：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^[2]。激光聚焦后，功率密度高，焊接深宽比可达 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，将铜和钽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，能精确定位，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，极大地提高了焊接质量。

（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，焦点位于待加工区域附近，以求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在物体表面溅射出一个细小的孔。在计算机控制下，激光加工喷头与被加工材料按预先绘好的图形进行连续相对运动，加工成想要的形状。切割时一股与光束同轴的气流由切割喷头喷出，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，可极大减少加工时间，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理想的“削铁如泥”的宝剑。以早期的CO₂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高速状态下良好的加工精度。

激光切割可应用于金属零件和特殊材料，如圆形锯片、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CO₂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

激光熔覆技术指以不同添料方式在基体表面上经激光辐射使之与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