



“十二五”国家重点出版规划项目

现代激光技术及应用丛书

激光先进制造技术 及其应用

虞钢 何秀丽 李少霞 编著

Laser Manufacturing
and its Applications



国防工业出版社
National Defense Industry Press



“十二五”国家重点出版规划项目

/现代激光技术及应用丛书/

激光先进制造 技术及其应用

虞 钢 何秀丽 李少霞 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书以作者科研团队的研究成果为基础,结合国内外的最新成就,对激光先进制造技术及其应用进行了较全面的阐述。本书内容注重理论、试验、计算和应用的有机结合,包括工艺试验、性能检测、数值模拟、具体应用等。

本书共分为7章。第1章为概述,介绍激光束特性、激光与金属相互作用原理以及激光先进制造技术的特点和分类。第2章为激光先进制造系统。第3~6章介绍了几种典型的激光先进制造技术及其应用,其中第3章为激光焊接技术,第4章为激光打孔技术,第5章为激光表面改性技术,第6章为激光增材制造技术。第7章介绍了其他激光先进制造技术及其相关应用。

本书可供先进制造行业的科研人员和工程技术人员参考,也可以作为机械类、力学类、材料类等相关学科的研究生和高年级本科生的参考书使用。

图书在版编目(CIP)数据

激光先进制造技术及其应用/虞钢,何秀丽,李少霞
编著. —北京:国防工业出版社, 2016. 10
(现代激光技术及应用丛书)
ISBN 978-7-118-10984-9

I. ①激… II. ①虞… ②何… ③李… III. ①激光技术 IV. ①TN24

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 242009 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 28½ 字数 526 千字

2016 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 128.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

丛书学术委员会 (按姓氏拼音排序)

主 任	金国藩	周炳琨		
副主任	范滇元	龚知本	姜文汉	吕跃广
	桑凤亭	王立军	徐滨士	许祖彦
	赵伊君	周寿桓		
委 员	何文忠	李儒新	刘泽金	唐 淳
	王清月	王英俭	张雨东	赵 卫

丛书编辑委员会 (按姓氏拼音排序)

主 任	周寿桓			
副主任	何文忠	李儒新	刘泽金	王清月
	王英俭	虞 钢	张雨东	赵 卫
委 员	陈卫标	冯国英	高春清	郭 弘
	陆启生	马 晶	沈德元	谭峭峰
	邢海鹰	阎吉祥	曾志男	张 凯
	赵长明			

世界上第一台激光器于1960年诞生在美国,紧接着我国也于1961年研制出第一台国产激光器。激光的重要特性(亮度高、方向性强、单色性好、相干性好)决定了它五十多年来在技术与应用方面迅猛发展,并与多个学科相结合形成多个应用技术领域,比如光电技术、激光医疗与光子生物学、激光制造技术、激光检测与计量技术、激光全息技术、激光光谱分析技术、非线性光学、超快激光学、激光化学、量子光学、激光雷达、激光制导、激光同位素分离、激光可控核聚变、激光武器等。这些交叉技术与新的学科的出现,大大推动了传统产业和新兴产业的发展。可以说,激光技术是20世纪最具革命性的科技成果之一。我国也非常重视激光技术的发展,在《国家中长期科学与技术发展规划纲要(2006—2020年)》中,激光技术被列为八大前沿技术之一。

近些年来,我国在激光技术理论创新和学科发展方面取得了很多进展,在激光技术相关前沿领域取得了丰硕的科研成果,在激光技术应用方面取得了长足的进步。为了更好地推动激光技术的进一步发展,促进激光技术的应用,国防工业出版社策划组织编写出版了这套丛书。策划伊始,定位即非常明确,要“凝聚原创成果,体现国家水平”。为此,专门组织成立了丛书的编辑委员会,为确保丛书的学术质量,又成立了丛书的学术委员会,这两个委员会的成员有所交叉,一部分人是几十年在激光技术领域从事研究与教学的老专家,一部分是长期在一线从事激光技术与应用研究的中年专家;编辑委员会成员主要以丛书各分册的第一作者为主。周寿桓院士为编辑委员会主任,我们两位被聘为学术委员会主任。为达到丛书的出版目的,2012年2月23日两个委员会一起在成都召开了工作会议,绝大部分委员都参加了会议。会上大家进行了充分讨论,确定丛书目、丛书特色、丛书架构、内容选取、作者选定、写作与出版计划等等,丛书的编写工作从那时就正式地开展起来了。

历时四年至今日,丛书已大部分编写完成。其间两个委员会做了大量的工作,又召开了多次会议,对部分书目及作者进行了调整。组织两个委员会的委员对编写大纲和书稿进行了多次审查,聘请专家对每一本书稿进行了审稿。

总体来说,丛书达到了预期的目的。丛书先后被评为国家“十二五”重点出

版规划项目和国家出版基金资助项目。丛书本身具有鲜明特色:一)丛书在内容上分三个部分,激光器、激光传输与控制、激光技术的应用,整体内容的选取侧重高功率高能激光技术及其应用;二)丛书的写法注重了系统性,为方便读者阅读,采用了理论—技术—应用的编写体系;三)丛书的成书基础好,是相关专家研究成果的总结和提炼,包括国家的各类基金项目,如973项目、863项目、国家自然科学基金项目、国防重点工程和预研项目等,书中介绍的很多理论成果、仪器设备、技术应用获得了国家发明奖和国家科技进步奖等众多奖项;四)丛书作者均来自于国内具有代表性的从事激光技术研究的科研院所和高等院校,包括国家、中科院、教育部的重点实验室以及创新团队等,这些单位承担了我国激光技术研究领域的绝大部分重大的科研项目,取得了丰硕的成果,有的成果创造了多项国际纪录,有的属国际首创,发表了大量高水平的具有国际影响力的学术论文,代表了国内激光技术研究的最先进水平。特别是这些作者本身大都从事研究工作几十年,积累了丰富的研究经验,丛书中不仅有科研成果的凝练升华,还有着大量作者科研工作的方法、思路和心得体会。

综上所述,相信丛书的出版会对今后激光技术的研究和应用产生积极的重要作用。

感谢丛书两个委员会的各位委员、各位作者对丛书出版所做的奉献,同时也感谢多位院士在丛书策划、立项、审稿过程中给予的支持和帮助!

丛书起点高、内容新、覆盖面广、写作要求严,编写及组织工作难度大,作为丛书的学术委员会主任,很高兴看到丛书的出版,欣然写下这段文字,是为序,亦为总的前言。

金国藩 周灿强

2015年3月

前言

激光先进制造技术是以激光与材料相互作用为基础,将激光技术与计算机技术、网络技术、控制技术、传感技术、机-光-电一体化、创新工艺技术等相结合的一种先进制造技术。作为“现代激光技术及应用丛书”的分册之一,本书着重介绍激光先进制造技术及其应用。

制造业是国民经济的支柱,是立国之本、兴国之器、强国之基。打造具有国际竞争力的制造业,是提升我国综合国力、保障国家安全、建设世界强国的必由之路。《中国制造 2025》是我国实施制造强国战略第一个十年的行动纲领,先进制造是制造业的发展方向。作为 21 世纪先进制造领域的关键性和标志性技术之一,激光先进制造具有集成化、智能化、信息化和环境友好的特点,给现代制造带来了产品设计、制造工艺和生产观念的巨大变革,已成为工业发达国家在高技术产业领域竞争的制高点,具有重要的战略意义和应用价值。

激光先进制造以激光束作为高密度热源,通过激光与材料的相互作用,实现表面改性、去除、连接、增材制造等过程。随着工业激光器与配套制造系统的不断发展,业已形成了激光熔覆、激光标记、激光弯曲、激光切割、激光打孔、激光焊接、激光表面改性、激光直接沉积成形、激光烧蚀、激光修复等技术,几乎涵盖各种制造工艺。激光先进制造技术具有柔性和自适应性、制造过程的可预测性和可控性等特点,可解决传统制造手段不易实现的难题,非常适用于航空、航天、国防等领域中具有重大需求的高精尖零件的制造。同时,正在以前所未有的速度向机械制造、石化、船舶、冶金、电子和信息等领域扩展。

激光制造过程具有多场、多尺度和多参数的特点,涉及物理、材料、力学、控制、机械、仿真等多学科的耦合与交叉。激光制造过程中对宏观几何、微观结构和力学性能的控制是实现高精度、高性能零件制造的关键,通过多参数的最优配置才能满足产品的成形和质量要求。因此激光与材料相互作用原理、工艺过程、

试验方法、数值模拟以及工业应用是激光制造技术研究的主要内容。

作者在激光先进制造领域潜心研究多年,主持完成了包括国家自然科学基金重点和面上项目、国防基础科研及技术基础科研项目、国防“973”项目、中国科学院知识创新重大项目、瑞-中国际合作以及院地合作开发项目等多项科研及应用研究项目,并组建了国内最早从事激光制造工艺力学研究的实验室。本书以作者科研团队的研究成果为基础,结合国内外的最新成就,对激光先进制造技术及其应用分章节进行了较全面的阐述。

参加本书中相关学术及整理工作的同志包括陈茹、甘政涛、苗海宾、王高飞、朱天辉、陈旭阳、张越、刘昊、葛志福、卢国权、刘潞钊等。特别感谢宁伟健、郑彩云、褚庆臣、孙培、赵树森、张永杰、武扬、聂树真、靳绍巍、胡耀武、王恒海等对本书所做的重要贡献。

本书总结了作者带领的研究团队的科研工作和工程实践,希望能对激光先进制造技术及其应用的发展有所推动。书中难免有所欠缺,恳请读者赐教。

作者
2016年7月

第1章 概述

1.1 激光束的特性	001
1.1.1 激光束的产生与特点	001
1.1.2 激光束的描述	004
1.1.3 激光束的传输与变换	009
1.2 激光与金属的相互作用	015
1.2.1 金属表面对激光的吸收与反射	016
1.2.2 激光对金属的热效应	021
1.3 激光先进制造技术	023
1.3.1 激光先进制造技术的特点	024
1.3.2 激光先进制造技术的分类	025
参考文献	031

第2章 激光先进制造系统

2.1 激光器系统	033
2.1.1 基本构成	033
2.1.2 制造用激光器	035
2.2 机器人系统	043
2.2.1 工业机器人	044
2.2.2 机器人控制	050
2.3 数字化辅助系统	055
2.3.1 先进传感器系统	055
2.3.2 数字化材料输送系统	060
2.3.3 智能测量系统	065
2.3.4 高纯度惰性气氛箱系统	068
2.4 激光先进制造系统集成	069
2.4.1 硬件系统集成	069

2.4.2 控制系统集成	072
2.4.3 专家数据库系统集成	084
参考文献	089

第3章 激光焊接技术

3.1 激光焊接原理与方法	093
3.1.1 激光焊接原理	093
3.1.2 激光焊接方法	094
3.2 数值计算方法	097
3.2.1 热源模型	097
3.2.2 网格划分	101
3.2.3 温度场求解	102
3.2.4 应力场求解	103
3.3 同种金属激光焊接	106
3.3.1 不锈钢的激光焊接	106
3.3.2 铝合金的激光-MIG 复合焊接	113
3.4 异种金属激光焊接	125
3.4.1 高温合金与钢的激光焊接	126
3.4.2 钛合金与钢的激光焊接	133
3.4.3 钛合金与铝的激光焊接	141
3.5 激光焊接应用	155
3.5.1 冷却板件的激光焊接	155
3.5.2 增压器涡轮与转轴的激光焊接	157
3.5.3 飞行器陀螺马达的激光焊接	158
3.5.4 火工产品的激光焊接	159
3.5.5 铝合金车身的激光-MIG 复合焊接	159
参考文献	161

第4章 激光打孔技术

4.1 激光打孔原理	164
4.2 激光打孔过程演化	166
4.2.1 实时观测	167
4.2.2 演化过程	167

4.3	工艺参数对孔形的影响	172
4.3.1	激光打孔截面形貌	173
4.3.2	孔形的特征参数	178
4.3.3	工艺参数的影响	182
4.4	激光打孔数值计算	197
4.4.1	数值模型	197
4.4.2	计算模拟	201
4.5	激光打孔应用	206
4.5.1	发动机喷油嘴喷孔	206
4.5.2	涡轮叶片冷却孔	208
	参考文献	210

第5章 激光表面改性技术

5.1	激光相变强化技术	213
5.1.1	原理及方法	213
5.1.2	工艺及参数优化	218
5.1.3	强化层组织	227
5.1.4	强化层性能	233
5.1.5	温度场数值模拟	238
5.2	激光熔覆技术	243
5.2.1	原理及方法	244
5.2.2	激光熔覆工艺	246
5.2.3	熔覆层组织	249
5.2.4	熔覆层性能	256
5.2.5	熔覆过程数值模拟	265
5.3	其他激光表面改性技术	270
5.3.1	激光合金化	271
5.3.2	激光非晶化	272
5.3.3	激光冲击强化	274
5.4	激光表面改性应用	275
5.4.1	冲压模具的激光相变强化	275
5.4.2	气门座的激光相变强化	278
5.4.3	缸盖火力面的激光熔覆	281
5.4.4	发动机叶片的激光冲击强化	282

参考文献	283
------	-----

第6章 激光增材制造技术

6.1 激光增材制造原理与方法	286
6.1.1 激光增材制造原理	286
6.1.2 激光增材制造方法	290
6.2 激光直接沉积成形	295
6.2.1 工艺参数	295
6.2.2 组织与性能	296
6.2.3 轨迹规划	305
6.2.4 过程监测与闭环控制	308
6.3 选区式激光成形	313
6.3.1 工艺参数	313
6.3.2 组织与性能	315
6.3.3 缺陷分析及防止措施	326
6.3.4 热处理对成形件组织和性能的影响	330
6.4 激光增材制造温度场数值模拟	333
6.4.1 温度场有限元计算模型	334
6.4.2 热历程演化规律	338
6.5 激光增材制造应用	346
6.5.1 零件的直接成形	346
6.5.2 激光的直接修复	349
参考文献	352

第7章 其他激光制造技术

7.1 激光微细加工技术	357
7.1.1 激光微细加工概况	357
7.1.2 准分子激光微细加工	358
7.1.3 飞秒激光微细加工	363
7.1.4 激光微细加工应用	372
7.2 激光弯曲成形技术	376
7.2.1 激光弯曲成形原理	376
7.2.2 激光弯曲成形工艺	379

7.2.3	激光弯曲成形应用	383
7.3	激光材料制备技术	386
7.3.1	选区式激光烧结陶瓷	386
7.3.2	激光加热基座生长晶体	391
7.3.3	脉冲激光溅射沉积薄膜	394
7.3.4	激光制备纳米材料	397
	参考文献	404

激光先进制造技术具有高精度、高自动化、高信息化、高智能化、绿色环保等优点,是一种涉及光学、材料、物理、力学、机械、控制等多个学科交叉的新兴技术,代表了未来制造业特别是先进制造的一种发展趋势。首先,作为激光制造的高密度能量源,激光束的特性直接影响着制造的产品形式、结果和质量;其次,激光与材料的相互作用原理是激光先进制造的基础,对深入理解激光制造过程、指导激光制造工艺至关重要;最后,根据不同的应用需求,激光先进制造技术形成了多种加工制造工艺。本章分别介绍激光束特性、激光与金属的相互作用和激光先进制造技术的特点和分类。

1.1 激光束的特性

20 世纪 70 年代,随着大功率激光器诞生,特别是固体激光器、气体激光器、半导体激光器、光纤激光器以及准分子激光器的出现并完善,激光制造开始快速发展。激光不同于普通光源,它具有很好的单色性、相干性和方向性,以及极高的功率密度和能量密度,这些特点使得激光广泛地应用于制造领域,形成了激光切割、激光焊接、激光表面改性、激光熔覆、激光打孔、激光成形等制造技术。而激光束的特性如波长、输出功率、聚焦能力、光束模式等对制造质量至关重要。

1.1.1 激光束的产生与特点

1. 激光的产生

由波尔的原子理论可知,原子系统具有一系列不连续的能级,原子能量的任何变化(吸收或辐射)都只能在某两个能级之间进行,原子的这种能量变化称为跃迁。具有一定高能量的光子,可以使处于某一定态的原子跃迁。与光子相互作用时,原子从一个能级跃迁到另一个能级,并相应地吸收或辐射光子,且光子的频率为

$$\nu = \frac{\Delta E}{h} \quad (1-1)$$

式中: ν 为频率; ΔE 为上下能级的能量差; h 为普朗克常量。

光与物质有三种相互作用的基本形式:自发辐射、受激辐射和受激吸收^[1,2]。

处于低能级 E_1 的一个原子在受到外界的激发、吸收了能量时,受激地向高能级 E_2 跃迁并吸收一个能量为 $h\nu$ 的光子,此过程就是受激吸收跃迁,如图 1-1(a) 所示。

处于激发态的原子是不稳定的,如果存在着可接纳原子的较低能级,即使没有外界作用,处于高能级的原子也可能自发地向低能级跃迁,同时辐射出能量为 ΔE 的光子,这种辐射过程称为自发辐射,如图 1-1(b) 所示。以自发辐射过程发出的光,相位是无规则分布的,偏振方向和传播方向也是不一致的,因此是非相关的。

除自发辐射外,处于高能级的原子也可能以另外一种方式跃迁到较低能级,即处于高能级的一个原子在频率为 ν 的辐射场的作用(激励)下受激发向低能级跃迁,并辐射出一个能量为 $h\nu$ 的光子,这个过程称为受激辐射过程,是受激吸收的反过程,如图 1-1(c) 所示。经过这个过程,频率为 ν 的光子数增加了,也就是说,原子与具有特定频率的外界粒子相互作用,发生光子的受激辐射,使外来激励光加强,具有光的放大作用。受激辐射是激光产生的物理基础。受激辐射过程发射的光子相位不再是无规则的,而是具有和外界辐射场相同的相位,受激辐射的光子与入射的激励光子属于同一光子态。即受激辐射场与入射辐射场具有相同的频率、相位、波矢,即传播方向和偏振方向相同。

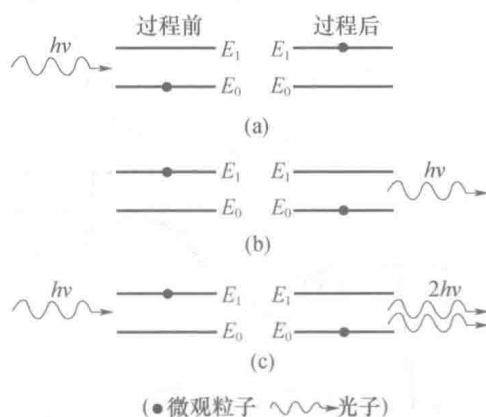


图 1-1 受激吸收、自发辐射、受激辐射

(a) 受激吸收; (b) 自发辐射; (c) 受激辐射。

在原子与外界粒子相互作用的过程中,即当一定频率的光射入工作物质时,光子受激吸收和受激辐射同时存在,其发生的概率与处于基态和激发态的粒子数有关。在热平衡状态时,物质的原子和分子处于各个能级的粒子数服从玻耳

兹曼统计规律分布:

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-\frac{E_2-E_1}{kT}} \quad (1-2)$$

式中: N_1 、 N_2 分别为处于低能级 E_1 、高能级 E_2 的粒子数; T 为平衡态时的温度; k 为玻耳兹曼常数。

正常情况下处于低能级的粒子数 N_1 远大于高能级的粒子数 N_2 , 即光的受激吸收概率大于受激辐射概率, 这样当光穿过工作物质时, 光的能量只会减弱不会增强。在这种条件下, 若要使受激辐射占优势, 需采取措施使粒子在能级上的分布倒转过来, 使处于高能级的原子数大于处于低能级的原子数, 即实现“粒子数反转”或“布居反转”^[3]。原子在基态时可以较长时间地存在, 而在激发态时平均寿命一般很短, 但若某一激发能级与较低能级之间没有或只有微弱的辐射跃迁, 则该态的平均寿命会很长 (不小于 10^{-3} s), 这种高能级称为亚稳态能级。此时若光射入工作物质, 且光子能量刚好等于亚稳态能级和低能态 (基态) 的能量差 ΔE , 则光的能量就会得到增强, 产生受激辐射, 输出大量相位、传播方向和偏振方向都相同的相干光, 这就是激光 (Laser), 激光是辐射的受激发射光放大 (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) 的简称。

2. 激光束的特点

激光的发射原理及产生过程的特殊性决定了激光具有普通光所不具有的特点: 单色性好, 方向性好, 相干性好, 亮度高 (功率密度高)。激光的上述四个特性不是孤立的, 它们之间存在着深刻的内在联系^[4]。实际上, 这四个特性的量子性根源是相同的, 因而本质上可归纳为一个特性, 即激光具有很高的光子简并度, 按照辐射的量子理论, 光辐射场是占据空间一定体积、一定立体角和一定频率范围的光子集合。光子分别处在一定数目的彼此可区分的量子状态 (或模式) 之内。每个量子状态内的平均光子数定义为光子简并度, 表示有多少个性质全同的光子共处一个量子状态内。光学谐振腔具有波形限制, 即模式选择作用, 激光的光子简并度可以非常高。大功率激光器输出的光子简并度可达 10^{20} 。而普通光源, 如太阳在可见光谱区的光子简并度只有 $10^1 \sim 10^2$ 量级。

正是由于激光束具有单色性好、方向性好、相干性好和亮度高 (功率密度高) 的特点, 或者说激光具有很高的光子简并度, 使激光束易于聚焦和导向, 方便传输和变换, 有很高的功率密度, 能够作为激光制造技术的热源。

1) 单色性好

原子发光是间隙的, 由傅里叶变换可知, 原子发光的寿命, 或者说持续发光时间 Δt 和所发光的频率宽度 $\Delta \nu$ 是成反比的。一个光源发射的光的谱线宽度越小, 则它的颜色就越纯, 看起来就越鲜艳, 就认为光源的单色性好。如果光波

的波长为 λ , 谱线宽度为 $\Delta\lambda$, 则光波的单色性表示为 $\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$ 或 $\frac{\Delta\nu}{\nu}$ 。显然发光时间越长, 谱线宽度越小, 比值越小, 单色性越好。普通光源发出的光包含较宽的波长范围, 即谱线宽度较大, 而激光器输出的激光束, 波长分布范围非常窄。对比同样输出红光的氦氖激光器和氦灯, 氦氖激光器输出光束谱线的宽度可窄到 $2 \times 10^{-9} \text{ nm}$, 其单色性为氦灯发射的红光的 $2/10000$ 。

2) 方向性好

方向性即光束偏离轴线的发散角, 常以平面角 θ 大小来评价。 θ 越小, 光束发散越小, 方向性越好。普通光源发出的光射向四面八方, 光束发散度大; 激光束的发散角很小, 激光照射到月球上形成的光斑直径仅有 1 km 左右。

激光的高方向性使其能够有效传递较长的距离, 同时保证优良的聚焦性, 得到高功率密度, 这两点是激光先进制造实现的重要条件。

3) 相干性好

相干性是区别激光与普通光源的重要特征。两束光在某一点相遇产生干涉的条件是: 频率相同, 振动方向相同, 相位差恒定, 且光的强度在叠加区域不是连续分布的, 而是在一些地方有极大值, 一些地方有极小值, 这种叠加区域出现的强度稳定的强弱分布的现象称为光的干涉现象, 即这两列波具有相干性。单色性越好, 相干长度越大, 方向性越好, 相干面积越大。

在普通光源中, 原子发光过程都是自发辐射过程, 各个原子的辐射都是自发、独立进行的, 各个原子发出的光子在频率、发射方向和初位相上都是不相同的, 所以, 在光源的不同位置发出来的光各不相同, 不具备相干性。而激光由于受激辐射的光子在相位上是一致的, 再加之谐振腔的选模作用, 使激光束横截面上各点间有固定的相位关系, 所以激光的空间相干性很好。

4) 亮度高(功率密度高)

一般认为, 光源在单位面积上向某一方向的单位立体角内发射的功率, 就称为光源在该方向上的亮度。对于可见光波段的激光而言, 光束的高功率密度表现为亮度大。普通光源发出的光能量无论从时间上还是空间上都弥散开去, 难以产生极高的强度。激光由于能量被集中在极短的时间内发射出来, 且激光束能通过一个光学系统(如透镜)聚集到一个很小的面积上, 其能量密度比普通光源高出 $10^{12} \sim 10^{19}$ 倍, 能够在焦点附近产生数千摄氏度乃至上万摄氏度的高温, 强激光甚至可产生上亿摄氏度的高温, 这就使激光束可能加工几乎所有的材料。

1.1.2 激光束的描述

高功率密度和高光束质量是对制造用激光源和激光应用技术提出的两个基本要求。对于激光制造来说, 激光束的质量和特性对制造结果至关重要。激光