



中航工业首席专家
技术丛书

“十二五”国家重点图书出版规划项目
中航工业科技与信息化部组织编写

巩水利 著

先进激光加工技术

ADVANCED LASER MATERIALS
PROCESSING TECHNOLOGY

航空工业出版社

中航工业首席专家技术丛书

“十二五”国家重点图书出版规划项目

先进激光加工技术

巩水利 著

航空工业出版社

北 京

内 容 提 要

本书从激光加工设备、过程控制、材料加工、工艺技术等方面,论述了激光材料加工的相关应用技术。内容既包括激光材料加工中相对成熟的应用技术,如激光焊接、激光切割、激光打孔等,同时还涉及众多前沿应用技术领域,如半导体激光材料加工、短脉冲制孔技术等。全书包括12章,相关应用技术按专题展开。

本书可供工程技术人员、激光材料加工领域科研人员、材料学专业科研人员参考阅读,也可作为激光设备研发人员、光学科研人员、激光应用物理学等相关领域科技人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

先进激光加工技术/巩水利著. --北京:航空工业出版社,2016.11

(中航工业首席专家技术丛书)

ISBN 978-7-5165-1143-5

I. ①先… II. ①巩… III. ①激光加工 IV.

①TG665

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第303663号

先进激光加工技术

Xianjin Jiguang Jiagong Jishu

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区北苑2号院 100012)

发行部电话:010-84936597 010-84936343

北京隆元普瑞彩色印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经售

2016年11月第1版

2016年11月第1次印刷

开本:787×1092 1/16

印张:20.0

字数:509千字

印数:1—2000

定价:145.00元

总 序

航空工业被誉为“现代工业之花”，是国家战略性高技术产业，同时也是技术密集、知识密集、人才密集的行业。中国是世界航空产业格局中的后来者，而中航工业作为支撑中国航空工业发展的核心力量，履行国家使命，必须大力推进自主创新，必须在科技创新和知识创新上有所作为。

从2009年开始，中航工业按照航空技术体系，在科研一线技术人员中陆续遴选出近百位集团公司级“首席技术专家”。此举既是集团公司对这些技术人员技术水平和能力的肯定，也意味着集团公司赋予了他们更大的责任和使命。我们希望这些技术专家在今后的工作中，要继续发挥科研技术带头人的作用，更加注重学习和创新，不断攀登航空科技新的高峰；要坚持潜心科研，踏实工作，不断推动航空科技进步；要带队伍、育人才，打造高水平的科研队伍，努力培养更多的高层次专业技术人才，为中航工业的发展作出更大的贡献。

21世纪企业的成功，越来越依赖于企业所拥有知识的质量，利用企业所拥有的知识为企业创造竞争优势和持续竞争优势，这对企业来说始终是一个挑战。正因如此，“知识管理”在航空工业等高科技产业领域得以快速推广和应用。依照这个思路，将首席技术专家们所积淀和升华出来的显性或隐性知识纳入知识管理体系，是进一步发挥其人才效益的重要方式，也是快速提升中航工业自主创新能力的重要途径。

知识管理理论的核心要义，就是把知识作为一种重要资产来进行管理，正如知识管理的创始人斯威比所说：“知识资本是企业的一种以相对无限的知识为基础的无形资产，是企业核心竞争能力的源泉。”如果专家们把其掌握的各类显性或隐性知识，用书面文字的形式呈现出来，就相当于构建了一个公共资料库，提供了一个交流平台，可以让更多的人从中受益——这就是出版这套“中航工业首席专家技术丛书”的初衷。

集团公司的这近百位“首席技术专家”，基本覆盖了航空工业的所有专业。每位专家撰写一部专著，集合起来，就相当于一个航空工业的“四库全书”，很有意义。在此，我要特别感谢这些专家们，他们在繁重的科研生产任务中，不辞辛劳地撰写出了自己的专著，无私地将自己的宝贵经验呈现给大家，担当起了传承技术、传承历史的责任。

相信这套丛书的出版，会使更多的航空科技工作者从中获益，也希望在一定程度上能助力中航工业的自主创新，对我国航空工业的科技进步产生积极影响。

A stylized black ink signature of Lin Yiming (林右鸣) in cursive script.

中国航空工业集团公司董事长

前 言

激光加工技术是 21 世纪最重要的先进制造技术之一，具有非接触、能量精确可控、材料适应性广、柔性强、质量优、资源节约、环境友好等综合优势，既可用于大批量高效自动化生产，又适用于多品种、小批量加工，甚至个性化产品的定制，因此成为传统制造业改造升级不可或缺的重要技术。高能束流加工技术在工业中所占的比重已成为衡量一个国家工业制造水平高低的重要指标之一，是研制生产高、精、尖武器装备的关键技术，对保障国家安全和促进国民经济发展具有重要意义。经过多年的发展，激光加工技术已经发展为高能束流加工技术在焊接与去除、表面工程和增材制造（3D 打印）三大制造技术领域重要的技术手段之一，形成了焊接、切割、制孔、快速成形、刻蚀、微纳加工、表面改性、喷涂及气相沉积等多种门类技术，在航空、航天、船舶、兵器、核能、交通、医疗等诸多领域发挥着重要的作用。

为了推动激光加工技术在相关领域的推广和应用，加速我国激光加工技术人才培养，作者在所在单位中国航空工业集团公司北京航空制造工程研究所（简称北京航空制造工程研究所）和高能束流加工技术重点实验室的大力支持和帮助下，总结作者所领导的团队多年来从事激光加工技术研究、应用的经验和部分成果，编写成本书。

本书重点从激光加工设备、过程控制、材料加工、工艺技术等方面，系统归纳激光材料加工的相关应用技术。内容既包括激光材料加工中相对成熟的应用技术，如激光焊接、激光切割、激光打孔，同时还涉及众多前沿应用技术领域，如半导体激光材料加工、短脉冲制孔技术等。该书不仅可以作为工程技术人员、激光材料加工领域科研人员、材料学专业科研人员参考应用，而且对于激光设备研发人员、光学科研人员、激光应用物理学相关领域的科技人员， also 具有很高的参考价值。

本书的内容安排旨在解决激光材料加工领域的相关工程应用技术难点，为读者提供从基础理论、工艺过程、应用技术等多方面的支持，涉及的加工材料包括金属材料、陶瓷材料、半导体材料和其他材料。全书共包括 12 章，激光材料加工的相关应用技术按专题展开。

本书是一本激光材料加工技术的专业技术书籍，涉及的专项技术领域全面，包括激光加工共性技术、宏观激光加工技术等。内容设置不仅考虑各种激光加工技术的基础理论，而且重点分析基础理论、材料作用机理背后的工艺相关性和加工过程技术，突出该书的工程应用价值。本书部分激光材料加工专项涉及航空、航天等装备制造关键技术，如激光精密制孔、激光快速造型等，具有重要的参考价值。

在本书的编写过程中，得到了我的同事和学生的大力支持和帮助，其中参加各章撰写的有：车志刚（博士，高级工程师）、曹子文（高级工程师）、张晓兵（研究员）、陈俐（博士，研究员）、段爱琴（博士，研究员）、姚伟（高级工程师）、何恩光（工程师）、马旭颐（博士）、单飞虎（博士）、王翔宇（硕士）、李嘉宁（博士）、马国佳（博士，高级工程师）、王西昌（博士，高级工程师）、李淑青（博士，高级工程师）、邹世坤（博士，研究员）、李怀学（博士，高级工程师）。在此，谨向他们表示衷心的感谢。还要感谢本书参考文献所列的作者，他们的著作和论文为本书的编写提供了帮助。

由于作者水平有限，书中难免存在不当和不足之处，敬请广大读者批评指正。

巩水利
2016年7月

目 录

第 1 章 激光材料加工概述	(1)
1.1 激光产生的基本原理	(1)
1.1.1 基本概念	(1)
1.1.2 激光产生的基本条件	(2)
1.2 激光束的特性	(3)
1.3 激光材料加工	(3)
1.3.1 激光材料加工基本原理	(3)
1.3.2 激光材料加工基本特点	(4)
1.3.3 激光材料加工分类	(4)
1.3.4 激光加工技术在航空工业中的应用	(5)
第 2 章 激光与材料的相互作用	(7)
2.1 引言	(7)
2.2 材料表面对激光的吸收与加热	(7)
2.2.1 材料宏观光学常量与激光吸收之间的关系	(7)
2.2.2 激光在材料中的微观吸收机理	(8)
2.2.3 激光吸收率	(9)
2.2.4 激光热源模型及其在固体材料中产生温度场	(10)
2.3 激光作用材料的熔化和汽化	(12)
2.3.1 激光作用下材料的浅层熔化	(12)
2.3.2 激光作用下材料的深层熔化	(12)
2.3.3 激光作用下材料的小孔现象与液态质量迁移	(13)
2.3.4 激光作用下材料的汽化	(13)
2.3.5 激光作用下材料的后退速度与气态质量迁移	(13)
2.4 激光诱导等离子体及其力学效应	(14)
2.4.1 激光等离子体产生机制	(14)
2.4.2 等离子体对激光的吸收和激光等离子体屏蔽现象	(14)
2.4.3 激光支持的吸收波	(15)
2.4.4 激光与材料表面的冲量耦合	(16)
2.5 激光作用材料组织相变	(17)

第3章 材料加工类激光器设备.....(19)

3.1 前言(19)

3.1.1 激光器的组成(19)

3.1.2 激光器的分类(19)

3.2 常用激光器的原理与结构(21)

3.2.1 He-Ne 激光器(21)

3.2.2 CO₂ 激光器(25)

3.2.3 Nd: YAG 固体激光器(30)

3.2.4 光纤激光器(33)

3.2.5 碟片激光器(39)

第4章 激光材料加工系统组成.....(42)

4.1 引言(42)

4.2 激光器(42)

4.3 光路整形与传输系统(42)

4.3.1 光路整形系统(43)

4.3.2 光束传输系统(45)

4.4 运动轨迹控制与操作系统(46)

4.5 典型激光材料加工系统与设备(47)

4.5.1 大功率 CO₂ 激光多功能加工设备(48)

4.5.2 大功率 YAG 激光焊接平台(61)

4.5.3 双光束激光焊接系统——基于机器人激光双光束填丝焊接系统(61)

4.5.4 先进激光切割设备——大型数控五轴联动光纤激光切割机(62)

4.5.5 激光制孔设备(63)

4.5.6 激光增材制造设备(66)

4.5.7 激光冲击强化设备(73)

第5章 激光产品危害及材料加工安全防护.....(77)

5.1 激光产品危险等级分类(77)

5.1.1 第Ⅰ类激光设备(77)

5.1.2 第Ⅱ类激光设备(77)

5.1.3 第Ⅲa类激光设备.....(77)

5.1.4 第Ⅲb类激光设备.....(77)

5.1.5 第Ⅳ类激光设备(78)

5.2 激光危害(78)

5.3 激光安全使用的防护标准和措施(79)

5.3.1 激光防护安全标准	(79)
5.3.2 激光防护措施	(80)
5.3.3 激光的安全与防护	(81)
5.4 激光材料加工工程要求	(82)
第 6 章 激光焊接技术基础	(83)
6.1 激光焊接的原理与特点	(83)
6.2 激光焊接技术基础研究与应用	(87)
6.2.1 激光焊接熔池行为研究	(87)
6.2.2 激光深熔焊接过程监测技术	(95)
6.2.3 激光焊接缺陷形成机理与控制技术研究	(97)
6.2.4 激光焊接接头形状、组织与性能相关性	(103)
6.2.5 激光焊接工艺优化与过程稳定性控制技术研究	(104)
6.3 先进激光焊接技术	(105)
6.3.1 激光深熔焊接	(105)
6.3.2 激光热导焊接	(112)
6.3.3 激光钎焊	(113)
6.3.4 偏心回旋光束激光焊	(115)
6.3.5 水下激光焊	(115)
6.3.6 激光压焊	(115)
6.3.7 激光—电弧复合焊接技术	(116)
6.3.8 激光填丝焊技术	(117)
6.3.9 双光束激光焊接	(117)
6.3.10 超窄间隙激光焊接	(119)
6.4 激光焊接自动化及质量控制技术	(123)
6.5 激光焊接技术应用研究	(125)
6.6 激光焊接技术发展趋势	(130)
6.6.1 高功率、低成本、高可靠性的焊接激光器成为未来发展的主流	(130)
6.6.2 集成化、智能化、柔性化成为未来激光焊接技术发展的重要方向	(131)
第 7 章 典型钛合金激光焊接技术及其应用研究	(133)
7.1 典型钛合金激光深熔焊缺陷形成机理与控制技术	(133)
7.1.1 钛合金激光焊气孔特征	(133)
7.1.2 钛合金激光焊气孔形成机理分析	(136)
7.1.3 钛合金激光焊气孔缺陷控制技术	(138)
7.1.4 小结	(138)
7.2 激光深熔焊接焊缝成形与工艺参数优化	(139)

7.2.1	薄板钛合金激光焊缝成形观察与热作用分析	(139)
7.2.2	焊接工艺参数对焊缝成形的影响	(145)
7.2.3	小结	(157)
7.3	激光深熔焊接焊缝成形与性能相关性	(158)
7.3.1	钛合金激光焊的焊缝组织特征	(160)
7.3.2	钛合金激光焊接头的力学性能	(177)
7.3.3	小结	(193)
第 8 章	铝合金激光焊接技术及其应用研究	(194)
8.1	铝合金激光深熔焊接熔池行为	(194)
8.1.1	铝合金激光深熔焊接过程金属蒸气 / 等离子体行为	(194)
8.1.2	铝合金激光深熔焊接过程小孔行为	(195)
8.2	铝合金激光深熔焊气孔缺陷形成机理研究	(205)
8.2.1	铝合金激光深熔焊焊缝气孔特征	(205)
8.2.2	铝合金激光深熔焊焊缝气孔缺陷的影响因素	(210)
8.2.3	小孔行为对激光深熔焊焊缝工艺型气孔的影响	(215)
8.3	铝合金激光深熔焊焊缝表面下塌缺陷机理研究	(217)
8.3.1	焊缝表面下塌的影响因素	(217)
8.3.2	熔池行为对激光深熔焊焊缝表面下塌的影响	(219)
8.4	铝合金激光深熔焊接焊缝成形与性能相关性	(222)
8.4.1	试验方法和试验条件	(222)
8.4.2	试验结果及分析	(223)
8.4.3	焊缝的断裂机理	(227)
8.4.4	结论	(229)
8.5	典型结构激光焊接——铝合金套筒激光电弧复合焊接	(229)
8.6	铝合金激光焊接应力与变形行为及控制技术研究	(230)
8.6.1	残余应力测量方法	(230)
8.6.2	测试试件及工艺	(230)
8.6.3	测试方法和布点方案	(231)
8.6.4	残余应力测量结果及其分析	(231)
第 9 章	激光表面处理技术	(233)
9.1	概述	(233)
9.2	激光表面热处理	(233)
9.2.1	激光熔覆	(234)
9.2.2	激光合金化	(238)
9.2.3	激光相变硬化	(243)

9.2.4 激光快速熔凝	(244)
9.2.5 激光非晶化	(245)
9.3 激光冲击强化	(247)
9.3.1 激光冲击强化的原理和特点	(247)
9.3.2 激光冲击强化的应用及进展	(248)
9.3.3 激光冲击强化整体叶盘	(249)
9.3.4 激光冲击强化焊接结构	(249)
9.3.5 孔结构强化	(250)
9.3.6 激光冲击成形机翼壁板	(251)
9.3.7 核工业上的应用	(251)
9.3.8 其他方面的应用	(252)
9.3.9 最新技术发展	(252)
9.4 激光毛化	(253)
9.4.1 激光毛化原理	(253)
9.4.2 激光毛化技术的特点	(254)
9.4.3 激光毛化技术应用现状	(255)
9.5 激光喷涂及复合热源喷涂	(256)
9.5.1 激光喷涂	(256)
9.5.2 复合热源喷涂	(257)
9.6 激光表面抛光和清理	(258)
9.6.1 激光抛光	(258)
9.6.2 激光清洗	(260)
9.7 激光表面结构功能一体化制造技术	(265)
9.7.1 概念内涵	(265)
9.7.2 发展现状及应用前景	(266)
第 10 章 激光增材制造技术	(269)
10.1 概述	(269)
10.2 激光直接沉积增材制造技术	(271)
10.2.1 激光直接沉积技术的工作原理	(272)
10.2.2 激光直接沉积技术国外研究现状	(272)
10.2.3 激光直接沉积技术国内研究现状	(278)
10.2.4 激光直接沉积技术的发展趋势	(280)
10.3 激光选区熔化增材制造技术	(280)
第 11 章 激光切割技术	(288)
11.1 概述	(288)

11.2	激光切割的原理	(288)
11.3	激光切割的特性	(289)
11.4	激光切割工艺参数控制	(290)
11.5	CO ₂ 激光与光纤激光切割工艺及质量对比	(291)
11.5.1	切割速度	(291)
11.5.2	切割质量	(291)
11.6	常用工程材料的激光切割应用	(292)
11.6.1	金属材料激光切割应用实例	(292)
11.6.2	非金属材料的激光切割	(294)
第 12 章 激光制孔技术		(296)
12.1	概述	(296)
12.2	激光制孔的优点	(296)
12.3	激光制孔的主要方式	(296)
12.4	激光制孔存在的主要问题	(297)
12.5	激光制孔应用发展趋势	(298)
参考文献		(300)

第 1 章 激光材料加工概述

1.1 激光产生的基本原理

1.1.1 基本概念

激光的英文单词“laser”来源于“light amplification by stimulated emission of radiation”的缩写，意思是受激辐射光放大。最初“laser”的中文翻译直接音译为“镭射”（目前中国的香港和台湾等地仍然沿用此名称），后在科技界泰斗钱学森的倡导下，国内统称为“激光”。

激光是通过光与物质相互作用，即所谓的受激辐射光放大产生的。

理解受激辐射光放大需要了解爱因斯坦提出的自发辐射、受激吸收和受激辐射的概念。

(1) 自发辐射

在热平衡情况下，绝大多数原子都处于基态，处于基态的原子，从外界吸收能量后，会跃迁到能量较高的激发态。

处于激发态的原子，在没有任何外界作用下，它倾向于从高能级 E_2 跃迁到低能级 E_1 ，并把相应的能量释放出来。能量释放的方式有两种：一种是以热量的形式释放，称为无辐射跃迁；另一种是通过光辐射形式释放，称为自发辐射跃迁，见图 1-1。

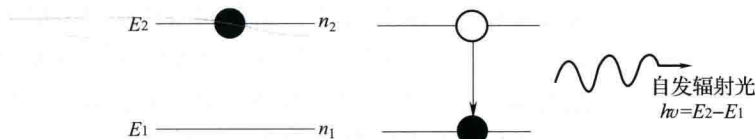


图 1-1 自发辐射跃迁示意图

自发辐射只与原子本身性质有关，所以是完全随机的，各个原子在自发跃迁过程中彼此无关，因此产生的自发辐射光的相位、偏振态以及传播方向上是杂乱无章的，光能量分布在一个很宽的频带范围内。日常生活中普通照明灯的发光属于此类。

(2) 受激吸收

原子受到外来的能量为 $h\nu$ (h 为普朗克常量， ν 为光子频率) 的光子作用（激励）下，处于低能级 E_1 的原子由于吸收了该光子的能量而跃迁到高能级 E_2 ，这种过程称为光的受激吸收，如图 1-2 所示。

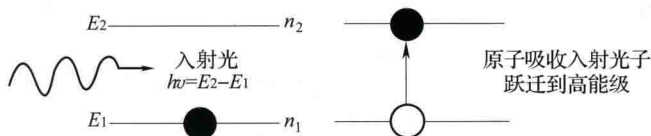


图 1-2 受激吸收示意图

受激跃迁与自发跃迁是本质不同的物理过程。后者只与原子本身的性质有关，而前者不仅与原子性质有关，还与辐射场密切相关。

(3) 受激辐射

受激辐射与受激吸收的过程正好相反，当原子受到外来的能量为 $h\nu$ 的光子作用时，处在高能级 E_2 上的原子也会在能量为 $h\nu$ 光子诱发下，从高能级 E_2 跃迁到低能级 E_1 ，这时原子发射一个与外来光子一模一样的光子，这种过程叫受激辐射，如图 1-3 所示。

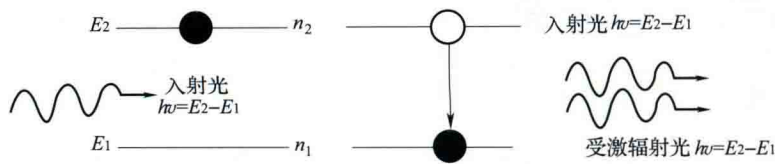


图 1-3 受激辐射示意图

与普通光相比，激光具有相干性、单色性、方向性好的优点，正是利用了受激辐射可以诱发与入射光子一模一样光子的这一特点。

1.1.2 激光产生的基本条件

物质在热平衡状态时，高能级上的粒子数总是少于低能级上的粒子数。因此，在通常情况下，受激吸收比受激辐射更频繁地出现。但是如果使高能级的粒子数 (n_2) 大于低能级粒子数 (n_1)，这样当频率为 $\nu = (E_2 - E_1) / h$ 的光通过该物质时，就可以实现受激辐射光子数大于受激吸收光子数，从而实现受激辐射光放大。

物质中 $n_2 > n_1$ 称为粒子数反转，这种物质也被称为激活介质或激光工作介质。实现粒子数反转的过程叫作激励过程或泵浦过程，这也是受激辐射光放大的必要条件。

由于实际应用的激活介质不可能做得太长，因此通常采用在激活介质（放大器）两端放置两块镀有高反射率膜的反射镜，形成光学谐振腔。这样，激光将在反射镜间的激活介质中往复传播放大。通常所说的激光器就是指由光放大器和光学谐振腔两部分组成的激光自激振荡器，如图 1-4 所示。光学谐振腔决定并限制了激光的传播方向。

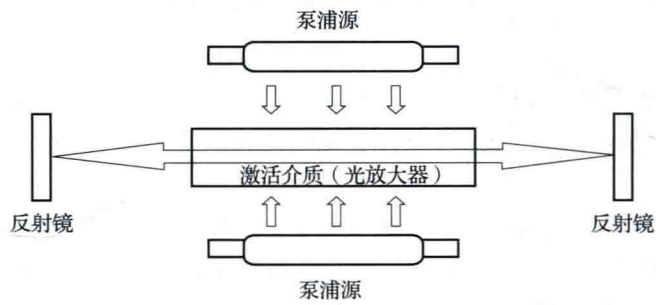


图 1-4 激光器示意图

总之，激光产生必须具备以下三个条件：

- ①有能够实现粒子数反转的适合产生激光的物质（工作介质）；
- ②有外界激励源（泵浦源）；
- ③有实现激光振荡的谐振腔。

1.2 激光束的特性

如前所述,激光是一种受激辐射光,是在一定条件下光电磁场和激光工作物质相互作用,以及光学谐振腔选模作用的结果。

激光束与普通光相比,最突出的特性是单色性、方向性、相干性和高亮度,另外一个特点是瞬时性。

(1) 瞬时性

是指激光器通过调 Q 、锁模等脉冲压缩技术可以实现激光脉冲持续时间仅为纳秒(ns , 10^{-9}s)、皮秒(ps , 10^{-12}s)甚至飞秒(fs , 10^{-15}s)。

(2) 方向性

一般采用光束发散角表征方向性,指激光束在传播方向的发散性。激光的最小光束发散角受衍射效应的限制,衍射极限发散角 θ_m 取决于激光输出孔径 D 和激光波长 λ ,表达式为

$$\theta_m = \lambda / D$$

不同类型激光器的方向性差别很大,它与工作物质的类型、均匀性、光腔类型、腔长、泵浦方式以及激光器的工作状态等有关。例如,He-Ne气体激光器, $\lambda = 0.6328\mu\text{m}$,取 $D = 3\text{mm}$,则衍射极限 $\theta_m = 2 \times 10^{-4}\text{rad}$ 。

(3) 单色性

单色性是指光源谱线的宽窄程度,例如,He-Ne激光器的线宽极限可达 10^{-4}Hz ,单色性非常好。

(4) 相干性

相干性是指光在不同时刻、不同空间点上两个光波场的相关程度。相干性又可分为空间(横向)相干性和时间(纵向)相干性。

(5) 高的亮度

光源的亮度是表征光源定向发光能力强弱的一个重要参量,其定义为

$$B = \frac{\Delta P}{\Delta S \Delta \Omega} \quad (1-1)$$

其量纲为 $\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr})$ 。

对于激光束而言,式中 ΔP 为激光功率, ΔS 为激光束截面面积, $\Delta \Omega$ 为光束立体发散角。普通光源由于方向性很差,亮度极低。例如,太阳的亮度值为 $B = 2 \times 10^3 \text{cm}^2 \cdot \text{sr}$ 。而激光束由于方向性非常好,发散角很小,其亮度是普通光无法比拟的。一般激光器的亮度值可以达到 $B = 10^4 \sim 10^{11} \text{cm}^2 \cdot \text{sr}$ 。

1.3 激光材料加工

1.3.1 激光材料加工基本原理

激光作为一种新的能量形式在20世纪60年代被人类掌握之后,很快便被应用于工业

制造领域。激光加工技术主要将激光作为热源使用，充分利用了激光束流好的方向性、高亮度和瞬时性的特征。

激光通过光学聚焦系统极易获得较高的功率密度。例如，2kW 的 CO_2 激光束聚焦后典型的光斑直径大小仅为 0.2mm，功率密度可以达到 $0.6 \times 10^6 \text{W/mm}^2$ ，而相应的电弧功率密度仅为 $5 \sim 500 \text{W/mm}^2$ ，而且激光功率密度易于控制，调节范围一般为 $10^2 \sim 10^{10} \text{W/cm}^2$ 。

利用不同功率密度激光与材料相互作用过程中或作用后产生的不同的物理、化学效应，可以实现不同的应用目的。以金属材料钢为例，当激光以 $10^2 \sim 10^3 \text{W/cm}^2$ 的功率密度入射到其表面时，材料表面将达到相变温度从而产生相变硬化；当激光功率密度达到 $10^4 \sim 10^5 \text{W/cm}^2$ 时，钢会产生熔化，从而可以利用激光来焊接、熔覆等；当激光功率密度达到 $10^5 \sim 10^8 \text{W/cm}^2$ 时，材料会蒸发，此时可以利用激光开展打孔、切割、划片等去除材料的加工。激光冲击强化则需要激光功率密度达到 10^{10}W/cm^2 。

1.3.2 激光材料加工基本特点

目前，激光加工技术在工业领域已经得到了广泛应用。其特点可以概括为以下三个基本方面。

(1) 应用领域十分广泛

切割、打孔、打标、雕刻、焊接、熔覆、快速制造、表面处理、清洗、冲击强化、微细加工等制造技术均已成熟并得到广泛的应用。

(2) 灵活、快速、柔性

一台激光加工设备通常具备多种应用功能。例如，一台连续 CO_2 激光器，随工艺参数选择和工艺装置配置的不同，具备焊接、切割、熔覆、表面热处理等多种功能。

激光由于光束质量好，功率密度高，通常加工的速度快，造成的热影响小。随着激光技术的快速发展，如光纤激光器等，在较大的激光功率条件下，激光束仍能保持很好的束流品质而激光器体积却日益小型化，该激光器还可以采用光导纤维传导激光，因此，更充分地发挥了激光加工快速、柔性的特点。

(3) 可加工的材料范围大

激光不但可以加工金属材料，还可以对非金属材料进行加工，例如，陶瓷、玻璃、复合材料、聚合物、木质材料等，特别是还可以加工高硬度、高脆性及高熔点的材料。

1.3.3 激光材料加工分类

激光材料加工技术主要分为三个主要方向——激光连接与去除、激光表面工程、激光增材制造，以及以下四大类型。

(1) 激光去除 (laser material removal)

激光去除包括打孔 (drilling)、切割 (cutting)、雕刻 (engraving)、打标 (marking)、清洗 (cleaning)、划片 (scribing) 以及微细加工 (micro-machining) 等。由于激光光斑聚焦后可以达到微米甚至纳米量级，因此微细去除加工的尺寸精度已经可以达到 $1 \sim 50 \mu\text{m}$ 。

(2) 激光表面工程 (laser surface engineering)

该工艺涵盖的内容比较广泛，主要包括表面热处理 (硬化 (transformation hardening)、退火 (annealing))、表面合金化 (surface alloying)、熔覆 (cladding)、激光化学气相沉积 (LVCD)、