



全国高技术重点图书·激光技术领域

# 激光加工工艺手册

关振中 主编

中国计量出版社



# 激光加工工艺手册

主编 关振中

中国计量出版社



**图书在版编目(CIP)数据**

激光加工工艺手册/关振中主编. —北京:中国计量出版社,1998  
ISBN 7-5026-1061-8

I. 激… I. 关… III. 激光加工-工艺-技术手册 N. TG665-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 03498 号

**内 容 提 要**

激光加工技术是一门综合性高技术。本书汇集了我国“六五”、“七五”和“八五”计划的重点科技攻关成果,同时收集了大量国外先进资料。全书共分9篇,全面、系统地介绍了激光加工基本原理、激光器、激光机床和激光在打孔、切割、焊接、硬化、刻划、熔覆、毛化、表面强化、非晶化等方面的应用,以及激光加工质量检测和安全防护的各种标准。本书重视理论联系实际,配备了大量图表,具有很强的实用性和可操作性。

本书适于从事激光技术应用研究和工业生产的工程技术人员、大专院校师生以及工人阅读和参考。

中国计量出版社出版

北京和平里西街甲2号

邮政编码 100013

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

版权所有 不得翻印

\*  
787×1092毫米 16开本 印张28.125 字数944千字

1998年6月第1版 1998年6月第1次印刷

\*  
印数1—700 定价:58.00元

# 《激光加工工艺手册》

(编审委员会)

名誉主编：王大珩

名誉副主编：冯思健

主 编：关振中

主 审：孙中发

编 委：(按姓氏笔画为序)

卜宪章	王慰平	邓树森	刘要武
汤祖尧	孙 文	苏宝蓉	李光华
李雨田	杨明江	杨洗陈	房为捷
孟 勤	胡志强	胡建东	钟敏霖
黄维玲	梁 勇		

# 序

世界上第一台激光器于1960年在美国研制成功后不久,我国第一台红宝石激光器于1961年9月在中国科学院长春光机所诞生,这表明我国在激光技术领域的研究工作起步是相当早的。

激光技术从产生到实际应用,周期比较短,它与其它相关学科和技术相互交叉与渗透,从而派生出一些新的前沿领域。其中,激光加工技术的发展更快,应用领域在不断拓宽,规模不断扩大,其经济效益和社会效益越来越显著。

我国的激光加工技术,经过“六五”、“七五”和“八五”国家组织的重点科技攻关,已在激光器件、激光加工工艺等方面取得了初步的、可喜的成果:2~3kW横流CO<sub>2</sub>激光器、1kW快速轴流CO<sub>2</sub>激光器及百瓦级YAG激光器已形成一定批量生产能力,达到了较高的实用化水平。柴油机缸套的激光热处理,板材的激光切割与焊接,轧辊、叶片和抽油泵柱塞的激光熔覆等,已经具有相当的应用规模和较高的技术水平;激光毛化轧辊技术发展很快,前景广阔。

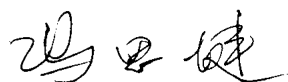
为了推动我国激光加工技术更快地健康发展,国家科委在“八五”期间安排了《激光加工工艺手册》的编写工作。《手册》的内容将尽可能地汇集我国在“六五”、“七五”乃至“八五”国家科技攻关取得的成果,同时吸收国外的先进经验并进行系统化和实用化的工作,以便于我国产业部门的工程技术人员、高级技工在工作中参考,同时对高校有关专业的师生、有关科研单位的科研人员也有一定参考价值。

参加《手册》编写工作的单位包括:开展激光加工研究、生产的有关中央和地方的科研单位、高校和企业;编写人员均是长期在这一领域从事研究、开发和推广工作的科技工作者和工程技术人员,大家都努力工作,希望做好这件事。

但是,激光加工技术毕竟还是一门新兴的、快速发展中的高新技术,许多问题仍在研究和开发之中,尚不成熟。因此,本《手册》只能提供给大家一个参考范围。由于采用的激光器件、光束质量不同,处理的材料与零件亦千差万别,不可能给出一个完全适合各种应用环境和条件的工艺规范。况且,已经或正在实施的工艺尚须不断改进、完善和提高。

我们希望《手册》的出版对促进我国激光加工产业化进程,对有关企业采用激光加工这一新技术,对工程技术人员具体实际操作能有所帮助!

殷切希望各方面同志对《手册》提出修改意见,以充实《手册》的内容。



# 前 言

自 60 年代初激光问世以来,随着世界科技与经济发展的需要,激光技术有了迅速的发展,尤其近十年其发展更为迅速,并极大地促进了激光加工技术更广泛的应用。

激光技术是一门综合性高技术。它涉及光学、机械学、电子学等学科,由于激光固有的四大特性(单色性、相干性、方向性和高能量密度),所以它广泛应用于工业、农业、国防、医学、科学实验和娱乐等诸方面,并发挥着重要的作用。

随着生产实践应用的需求,激光加工工艺越来越受到人们的重视。激光加工工艺涉及光、机、电、材料和其它相关的技术,对不同的加工对象,它有一定的内在规律和特点。我们编写此书的目的就是总结自“六五”国家科技攻关计划以来,我国在各个不同加工领域和不同加工对象与激光技术的相互关系,把实践的经验升华到理论上进一步指导工作实践。

本书适用于从事各种材料的激光打孔和切割、焊接、刻划、表面强化等方面应用研究和生产,供从事这方面工作的工程技术人员、教师和工人阅读,具有一定实用性、可操作性,是一本极好的、有价值的工具书。本书编委均为我国长期从事激光加工工艺研究资深的专家,书中尽可能对他们的工作经验进行总结,并参考国外的文献与资料,力求使本书的内容更接近实用化,更接近生产实践的需要。本书基本反映了我国现阶段激光加工工艺研究的水平,而且收录了我国激光加工技术安全防护标准和国内、外主要从事激光器和配套设备的公司和院校的产品推荐给读者,以便更好地选择硬件。

本书在编写过程中始终得到国家科委基础研究高技术司的关心和支持,同时,潘秀苗、盛延林同志为此书的顺利出版做了许多工作。

我国激光加工技术虽然已走过近 30 年,但是激光加工工艺系统研究与开发还很不够,有些激光加工工艺研究成果可能还未收录进来,已收入本书的还会有欠缺和不足,均有待今后的工作加以补充和提高。

编者

1997 年 3 月

# 《全国高技术重点图书》

## 出版指导委员会

主任：朱丽兰

副主任：刘 杲

卢鸣谷

总干事：罗见龙 梁祥丰

委员：(以姓氏笔画为序)

王大中

王为珍

牛田佳

王守武

刘 仁

刘 杲

卢鸣谷

叶培大

朱丽兰

孙宝寅

师昌绪

任新民

杨牧之

杨嘉墀

陈芳允

陈能宽

罗见龙

周炳琨

欧阳莲

张兆祺

张钰珍

张效祥

赵忠贤

顾孝诚

谈德颜

龚 刚

梁祥丰

## 《全国高技术重点图书》编审委员会

### 激光技术领域

主任委员：陈能宽

委员：(以姓氏笔画为序)

于 敏

王乃彦

甘福熹

史国成

刘 仁

陈佳洱

杜祥琬

俞大光

重现激光加工  
究·促进产品开发  
加速激光加工产业化

王石路

一九九六年

十月



# 目 录

## 第 1 篇 总论

第 1 章 绪论	(1)
第 1 节 激光的产生及发展简史	(1)
第 2 节 激光的特性	(2)
第 3 节 激光加工的特点	(3)
第 2 章 激光加工技术发展现状	(3)
第 1 节 概述	(3)
第 2 节 国外激光加工技术发展概况	(4)
第 3 节 我国激光加工技术研究与应用概况	(5)
第 3 章 激光加工产业化的若干问题	(6)
第 1 节 概述	(6)
第 2 节 采用激光加工技术应遵循的原则和要求	(6)
第 3 节 产业化的若干问题	(7)
第 4 节 加强激光加工工艺研究	(7)
参考文献	(8)

## 第 2 篇 激光加工的技术基础

第 4 章 激光加工用激光器及加工机床	(9)
第 1 节 CO <sub>2</sub> 激光器	(9)
第 2 节 激光加工用 YAG 激光器	(10)
第 3 节 激光加工用其它激光器	(10)
第 4 节 正确选用激光器	(11)
第 5 节 激光加工机	(12)
第 5 章 激光加工用光学元件	(12)
第 1 节 概述	(12)
第 2 节 激光器窗口	(13)
第 6 章 导光聚焦系统及元部件	(22)
第 7 章 激光与材料的相互作用	(25)
第 1 节 激光材料加工中的基本光学	(25)
第 2 节 激光固体加热	(30)
第 3 节 激光溶池动力学	(35)
第 4 节 激光等离子体现象	(39)
第 5 节 其它物理现象	(40)
第 8 章 激光束参数测量	(40)

第 1 节 加工用激光束参数测量的对象和任务	(40)
第 2 节 激光束功率、能量参数测量	(41)
第 3 节 激光束模式测量	(47)
第 4 节 激光束束宽、束散角、传播因子的测量	(48)
第 5 节 激光偏振态测量	(52)
参考文献	(56)

## 第 3 篇 激光打孔

第 9 章 概述	(58)
第 1 节 激光打孔的特点	(58)
第 2 节 激光打孔的发展概况	(59)
第 3 节 激光打孔的原理及物理过程	(60)
第 4 节 激光打孔的分类	(62)
第 10 章 激光打孔设备	(63)
第 1 节 激光打孔用激光器	(63)
第 2 节 激光打孔用光学系统	(66)
第 3 节 激光打孔用机床	(68)
第 4 节 激光打孔整机设备简介	(69)
第 11 章 激光打孔工艺	(71)
第 1 节 激光打孔工艺过程	(71)
第 2 节 影响激光打孔质量的主要参数	(71)
第 3 节 激光打孔的辅助工艺	(75)
第 4 节 激光打孔的质量检验	(76)
第 12 章 激光打孔应用实例	(77)
第 1 节 群孔激光打孔应用实例	(77)
第 2 节 喷嘴等零件激光打孔应用实例	(79)
第 3 节 各种材料激光打孔应用实例	(83)
第 13 章 激光打孔应用展望	(89)
参考文献	(90)

## 第 4 篇 激光切割

第 14 章 激光切割的特性与原理	(91)
第 1 节 激光切割的主要特性	(91)
第 2 节 汽化切割	(92)
第 3 节 熔化切割	(93)
第 4 节 氧化熔化切割	(93)

第5节 控制断裂切割 .....	(93)
第15章 激光切割机及工艺参数控制 .....	(93)
第1节 激光切割机的组成及特点 .....	(93)
第2节 主要工艺参数及其控制 .....	(98)
第3节 光束参数对切割质量的影响 .....	(100)
第4节 工件特性对切割质量的影响 .....	(101)
第5节 其它因素对切割质量的影响 .....	(103)
第16章 常用工程材料的激光切割 .....	(104)
第1节 金属材料的激光切割 .....	(104)
第2节 非金属材料的激光切割 .....	(107)
第3节 复合材料的激光切割 .....	(107)
第4节 其它材料的激光切割 .....	(108)
第5节 激光切割的展望 .....	(108)

### 第5篇 激光焊接

第17章 热传导焊接 .....	(109)
第1节 概述 .....	(109)
第2节 激光焊接热传导理论简述 .....	(109)
第3节 激光焊接工艺参数的选择 .....	(113)
第4节 激光焊接工艺方法 .....	(117)
第5节 激光钎焊 .....	(120)
第18章 激光深熔焊 .....	(121)
第1节 激光深熔焊工艺理论及影响因素 .....	(121)
第2节 激光深熔焊设备 .....	(125)
第3节 激光焊接接头设计 .....	(129)
第4节 钢铁材料的激光焊接 .....	(130)
第5节 有色金属的激光焊接 .....	(131)
第6节 其它材料的激光焊接 .....	(131)
第7节 焊接接头检验 .....	(132)

### 第6篇 激光硬化(激光淬火)

第19章 激光硬化的基本原理 .....	(133)
第1节 激光硬化分类 .....	(133)
第2节 激光与材料相互作用的物理过程 .....	(134)
第3节 金属材料在激光辐照下发生的变化 .....	(137)
第4节 含碳量及合金元素的影响 .....	(140)
第20章 激光硬化工艺及设备 .....	(143)
第1节 激光硬化工艺 .....	(143)
第2节 表面预处理对激光硬化效果的	

影响 .....	(150)
第3节 原始组织对激光硬化组织性能的影响 .....	(154)
第4节 激光硬化后金属材料的组织结构和性能 .....	(156)
第5节 激光硬化后的残余应力及变形 .....	(195)
第21章 激光硬化后的质量检测 .....	(197)
第1节 检测内容及方法 .....	(197)
第2节 激光硬化后的产品质量分析 .....	(210)
第22章 激光硬化典型实例 .....	(211)
第1节 激光硬化工艺适用范围 .....	(211)
第2节 激光硬化应用实例 .....	(211)
参考文献 .....	(232)

### 第7篇 激光熔覆与合金化

第23章 激光熔覆与合金化的基础 .....	(236)
第1节 激光熔池的温度场及其影响因素 .....	(236)
第2节 激光熔池的对流及其影响因素 .....	(238)
第3节 激光熔覆与合金化表面形貌及其控制 .....	(243)
第4节 激光熔覆与合金化的成分均匀性及其控制 .....	(246)
第5节 激光熔覆与合金化层的应力状态、裂纹与变形 .....	(255)
第6节 激光熔覆与合金化层的气孔及其控制 .....	(264)
第24章 激光熔覆 .....	(265)
第1节 常用激光熔覆材料 .....	(265)
第2节 激光熔覆工艺流程及相关工艺 .....	(275)
第3节 激光工艺参数对熔覆层形状特征的影响 .....	(279)
第4节 稀释率与激光工艺参数的关系 .....	(282)
第5节 预置粉末层的激光熔化过程与熔覆极限厚度 .....	(285)
第6节 镍基合金的激光熔覆 .....	(286)
第7节 钴基合金的激光熔覆 .....	(295)
第8节 铁基合金的激光熔覆 .....	(302)
第25章 激光表面合金化 .....	(307)

第1节	激光表面合金化类型	(307)
第2节	激光合金化参考的合金系	(307)
第3节	激光合金化成分设计及控制	(317)
第4节	合金化层的后续处理	(324)
第5节	预置涂层激光合金化实例	(325)
第6节	硬质粒子注入激光合金化实例	(334)
	参考文献	(336)

## 第8篇 激光加工在其它领域中的应用

第26章	激光毛化冷轧辊技术及应用	(338)
第1节	毛化技术发展概况	(338)
第2节	激光毛化轧辊原理与特点	(339)
第3节	激光毛化装备	(340)
第4节	激光毛化基本参数及对板材性能影响	(343)
第5节	YAG激光毛化应用效果	(346)
第27章	激光标记	(347)
第1节	概述	(347)
第2节	基本原理	(347)
第3节	激光标记的特点	(347)
第4节	不同标记方法的比较	(348)
第5节	激光标记方法	(349)
第6节	激光标记系统	(350)
第7节	激光标记用激光器	(351)
第8节	激光标记工艺的有关问题	(352)
第9节	国外激光标记技术概况	(354)
第10节	国内激光标记技术概况	(354)
第28章	激光雕刻印染圆网技术与应用	(355)
第1节	概述	(355)
第2节	激光雕刻印染圆网的工作原理	(356)
第3节	激光雕刻印染圆网技术的主要特点	(356)
第4节	激光雕刻印染圆网所用设备	(356)
第5节	激光雕刻工艺	(357)
第6节	应用前景	(358)
第29章	激光辐射烧结粉末冶金制品	(358)

第1节	概述	(358)
第2节	激光烧结体的组织与性能	(358)
第3节	激光烧结的主要工艺参数	(359)
第4节	激光烧结零件的实例	(360)
第5节	展望	(364)

第30章	激光化学气相沉积(LCVD)技术在石英光纤制造中的应用	(364)
第1节	概述	(364)
第2节	LCVD法的装置及其技术要求	(365)
第3节	工艺原理及过程	(366)
第4节	LCVD光纤的性能与应用前景	(367)
第31章	激光法制备纳米粉材料	(368)
第1节	概述	(368)
第2节	激光加热蒸发法制备纳米超细粉技术	(369)
第3节	激光气相反应法制备纳米超细粉技术	(371)
第4节	CO <sub>2</sub> 激光气相合成硅基纳米粉的制备及应用	(375)
第32章	激光焊接在金刚石工具工业中的应用	(380)
第1节	概述	(380)
第2节	金刚石制品的主要用途	(381)
第3节	金刚石工具制造工艺	(381)
第4节	激光焊接法	(381)
第5节	应用前景	(383)
第33章	激光非晶化	(383)
第1节	非晶态金属及其发展状况	(384)
第2节	激光非晶化的研究和发展	(387)
第3节	激光非晶化的应用	(392)
	参考文献	(392)

## 第9篇 激光加工的安全防护

第34章	激光辐射的危害	(394)
第1节	激光损伤组织的因素	(394)
第2节	激光对眼睛的危害	(395)
第3节	激光对皮肤的危害	(396)
第35章	使用激光时伴随的危害	(397)
第1节	电气危害	(397)
第2节	大气污染	(397)
第3节	伴随辐射危害	(397)

第4节	低温致冷剂	(397)	控制	(407)		
第5节	噪声	(397)	第2节	激光安全标志	(410)	
第6节	爆炸危险	(398)	第3节	个人防护用品	(412)	
第7节	火灾	(398)	第39章	激光加工作业的	安全管理	(415)
第36章	激光安全防护标准	(398)	第1节	单位领导要主管	激光安全	(416)
第1节	国际激光安全防护标准	(398)	第2节	激光安全员	(416)	
第2节	外国激光安全防护标准	(399)	第3节	激光加工主管	人员和工	
第3节	我国激光安全防护标准	(400)	人员	(417)		
第37章	激光危害分类	(401)	第4节	激光安全培训	(418)	
第1节	决定激光危害分类的因素	(402)	第5节	医学监督	(418)	
第2节	可达发射极限和激光危害		参考文献	(419)		
分类	(402)	附录1	部分激光加工	设备厂家		
第3节	激光加工系统危害分类举例	(405)	简介	(421)		
第38章	激光危害的工程控制	(406)	附录2	部分激光加工	设备生产单	
第1节	激光加工系统危害的工程		名录	(437)		

# 第 1 篇 总 论

## 第 1 章 绪 论

### 第 1 节 激光的产生及发展简史

激光在我国最初被称为“莱塞”，即英语“Laser”的译音，而“Laser”是“Light amplification by stimulated emission of radiation”（意为“辐射的受激发射光放大”）的缩写。大约在 1964 年，根据钱学森院士的建议，把光受激发射器改称为“激光”或“激光器”。

#### 1. 世界上第一台激光器的诞生

世界上第一台激光器是美国科学家梅曼 (T. H. Maiman) 于 1960 年研究成功的。这台红宝石激光器是用一根红宝石棒作为发光物质（棒两头镀上银膜形成反射镜面），棒外套上一支螺旋状的氙气灯，为了充分利用氙灯光，梅曼又在螺旋氙灯外套上一个反射率很高的圆柱，以便使更多的氙灯光照到红宝石上。

1960 年 7 月 7 日，纽约时报发表了梅曼研制成功第一台激光器的消息，随后又在英国 Nature 和 British Commun 发表，第二年其详细论文在 Physical Review 上刊出。

其实，早在 1916 年爱因斯坦就曾发表过一篇论文，提出了一种现在叫光学感应吸收和光学感应发射的观点（又叫受激吸收和发射）。有谁能想到，这一观点后来竟成为激光器的主要物理基础。1952 年，美国马里兰大学的韦伯开始运用上述概念去放大电磁波，但其工作没能往前发展，也没有引起科学界的广泛注意。只有激光的发明人汤斯 (C. Townes) 向韦伯索要了论文，继续了这一工作，才打开了一个新的领域。

汤斯的最初设想是，由四个反射镜围成一只玻璃盒，盒内充以铷，盒外放一个铷灯，使用这一装置便可产生激光。汤斯的合作者肖洛 (A. Schawlow) 长于光谱学，对原子光谱及两平行反射镜的光学特性十分熟悉，便对汤斯的设想提出两条修改意见：一是他证明铷原子不可能产生光放大，建议改用钾（其实钾也不易产生激光）；二是建议只用两面反射镜便可形成光的振荡器，不必沿用微波放大器的封闭盒子作为谐振器。直到现在，尽管激光器种类很多（各种气体的、固体的、离子的和半导体的等等），但汤斯和肖洛的这一构思仍为各类激光器的基本结构。

1958 年 12 月“Physics Review”发表了汤斯和肖洛的文章后，引起了物理学界的关注，许多学者参加了这一理论和实验研究，都力争自己能制造出第一台激光器。汤斯在哥伦比亚大学（用钾和铷为发光物质），肖洛在贝尔实验室（用红宝石为发光物质）也开展了实验研究，可惜他们都没有取得成功。原因是汤斯遇到了无法解决的铷和钾蒸气对反射镜的污染问题，而肖洛在实验研究后却误认为红宝石不能产生激光。可是，在一年多以后世界上出现的第一台激光器正是梅曼用红宝石制成的。

尽管世界上第一台激光器不是由汤斯和肖洛研制出来的，但是他们所提出的基本概念和构想却被公认是对激光领域划时代的贡献。

#### 2. 其它种类激光器相继问世

在世界上第一台红宝石激光器问世不久，1960 年年底，由工作在贝尔实验室的贾范发明了世界上第一台氦氖激光器，并且在影响下产生出一系列气体激光器。

此后，1962 年出现了半导体激光器；1964 年由帕特尔 (C. Patel) 发明了第一台  $\text{CO}_2$  激光器；1965 年发明了第一台 YAG 激光器；1968 年开始发展高功率  $\text{CO}_2$  激光器；直至 1971 年出现了第一台商用  $1\text{kWCO}_2$  激光器。

上述的一切，特别是高功率激光器的研制成功，为激光加工技术应用的兴起和迅速发展创造了必不可少的前提条件。



### 3. 激光在我国早期发展的成就

我国研究激光起步之快，早期发展之迅速，确实是值得我们自豪的！

由王之江领导建立的国内第一个固体红宝石激光装置是1961年9月在中国科学院长春光机所成功运行的；由邓锡铭领导建立的我国第一台气体激光装置（氦氖激光器）是1963年7月也是在中国科学院长春光机所成功运行的。其后在该所相继由王乃弘建立了镓砷半导体激光器；刘颂豪、沃新能用所里生产的晶体建立了氟化钙激光器；干福熹等建立了钕玻璃激光器；刘顺福建立了含钕钨酸钙晶体激光器；吕大元、余文炎建立了转镜Q开关激光器。

中国科学院长春光机所在这段时间里，能取得如此成绩绝非偶然，其中几点是至关重要的：第一是在王大珩等老一辈光学专家的带领下，该所几乎从零开始建立了应用光学的技术基础，这当中也包含一些重要的工艺基础。这些奠基性的创业工作对后来发展的影响是深远的，甚至是决定性的；第二是有一支学术思想活跃、具有创新精神的科技队伍和一批能工巧匠。

以上我们只是简要地介绍了在美国和在我国激光发源地的早期研究发展概况。在第一台激光器诞生后，随着其它种类激光器的不断问世，从事激光技术研究和应用的队伍也从原来只有为数不多的人参加的几个研究小组不断发展到今日的庞大队伍，有越来越多的人在这一领域做出了卓越贡献，这一点值得我们牢记。

## 第2节 激光的特性

概括地说，激光有四大特性：高亮度、高方向性、高单色性和高相干性。激光所具有的上述优异特性是普通光源望尘莫及的。

### 1. 激光的高亮度

光源的亮度（ $B$ ）定义为光源单位发光表面（ $S$ ）沿给定方向上单位立体角（ $\Omega$ ）内发出的光功率（ $P$ ）的大小，即

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

$B$  的单位为  $\text{W}/\text{cm}^2 \cdot \text{Sr}$ 。

太阳光的亮度值约为  $2 \times 10^3 \text{W}/\text{cm}^2 \cdot \text{Sr}$ ，而气体激光器的亮度值为  $10^8 \text{W}/\text{cm}^2 \cdot \text{Sr}$ ，固体激光器的亮度更高可达  $10^{11} \text{W}/\text{cm}^2 \cdot \text{Sr}$ 。这是由于激光器的发光截面（ $S$ ）和立体发散角（ $\Omega$ ）都很小，而其输出功率（ $P$ ）都很大的缘故。

不仅如此，具有很高亮度的激光束经透镜聚焦后，能在焦点附近产生数千度乃至上万度的高温，这就使其可能加工几乎所有的材料。

### 2. 激光的高方向性

激光的高方向性主要指其光束的发散角小。光束的立体发散角为

$$\Omega = \theta_2 \approx \left( 2.44 \frac{\lambda}{D} \right)^2 \quad (1-2)$$

式中， $\lambda$  为波长； $D$  为光束截面直径。一般工业用高功率激光器输出光束的发散角为毫拉德量级（ $\text{mrad}$ ）。

激光的高方向性使其能在有效地传递较长的距离的同时，还能保证聚焦得到极高的功率密度，这两点都是激光加工的重要条件。基模，高斯模，光束直径和发散角最小，其方向性也最好，这在激光切割和激光焊接中是至关重要的。

### 3. 激光的高单色性

单色性常用  $\Delta\nu/\nu = \Delta\lambda/\lambda$  来表征，其中  $\nu$  和  $\lambda$  分别为辐射波的中心频率和波长， $\Delta\nu$ 、 $\Delta\lambda$  是谱线的线宽。

原有单色性最好的光源是氩<sup>86</sup>灯，其  $\Delta\nu/\Delta\lambda$  值为  $10^{-6}$  量级。而稳频激光器的输出单色性  $\Delta\nu/\Delta\lambda$  可达到  $10^{-10} \sim 10^{-13}$  量级，要比原有单色性最好的氩<sup>86</sup>灯高几万至几千万倍。

由于激光的单色性极高，从而保证了光束能精确地聚焦到焦点上，得到很高的功率密度。

### 4. 激光的高相干性

相干性主要描述光波各个部分的相位关系。其中，空间相干性（ $S_{\text{相干}}$ ）描述垂直光束传播方向的平面上各点之间的相位关系；时间相干性（ $\Delta t_{\text{相干}}$ ）则描述沿光束传播方向上各点的相位关系。相干性完全是由光波场本身

的空间分布(发散角)特性和频谱分布特性(单色性)所决定的。

如前所述,激光的发散角和谱线宽度都很小,故其相干面积 $S_{\text{相干}} = \left(\frac{\lambda}{\theta}\right)^2$ 和相干长度 $L_{\text{相干}} = c \cdot \Delta t_{\text{相干}} = \frac{c}{\Delta\nu}$ 都很大。红宝石的相干长度为8000mm,氦氖激光相干长度则达 $1.5 \times 10^{11}$ mm,而原有相干性最好的氪灯相干长度仅为800mm,它与激光相差一个至数个数量级。

正由于激光具有如上所述的奇异特性,才使其得到了广泛地应用。激光在材料加工中的应用就是其应用中的一个重要领域。

### 第3节 激光加工的特点

由于激光具有的宝贵特性,因此就给激光加工带来如下一些其它方法所不具备的可贵特点:

- (1) 由于它是无接触加工,并且高能量激光束的能量及其移动速度均可调,因此可以实现多种加工的目的;
- (2) 它可以对多种金属、非金属加工,特别是可以加工高硬度、高脆性及高熔点的材料;
- (3) 激光加工过程中无“刀具”磨损,无“切削力”作用于工件;
- (4) 激光加工过程中,激光束能量密度高,加工速度快,并且是局部加工,对非激光照射部位没有或影响极小。因此,其热影响区小,工件热变形小,后续加工量小;
- (5) 它可通过透明介质对密闭容器内的工件进行各种加工;
- (6) 由于激光束易于导向、聚焦实现作各方向变换,极易与数控系统配合,对复杂工件进行加工,因此它是一种极为灵活的加工方法;
- (7) 生产效率高,加工质量稳定可靠,经济效益和社会效益好。

激光加工的上述特点可从下述应用实例中看得很清楚。

[例1] 美国通用电器公司采用板条激光器加工航空发动机上的异形槽,不到4h即可高质量完成,而原来采用电火花加工需9h以上,仅此一项,每台发动机造价就可节省5万美元。

[例2] 激光可在高硬度、高脆性材料上打出高精度孔,它的加工效率是电火花加工效率的12~15倍,是机械钻孔效率的200倍,而且还便于加工微孔、群孔和异形孔等。

[例3] 激光切割钢件其切割工效提高8~20倍,节省材料15~30%,可大幅度降低生产成本,且加工精度高,产品质量稳定可靠。

激光加工的许多特点和优势是很宝贵的,但是,其不足之处也是明显的,是不可忽视的。如目前激光加工系统设备价格还较贵,所以激光尚属一种比较昂贵的能源。因此,只有在那些最能发挥其特点或用其它方法不能或很难加工的情况下采用激光加工方为适宜。另外,许多欲采用此技术的工程技术人员目前对它尚不够熟悉等不利因素均需逐步加以解决。

## 第2章 激光加工技术发展现状

### 第1节 概 述

#### 1. 快速广泛地获得实际应用

激光是自1960年问世后就很快在实际中得到应用的高技术。其后,随着对有关基本理论研究的不断深化,各类激光器件不断地发展,从而使其应用领域也不断拓宽,应用规模逐渐扩大,所获得的经济效益和社会效益更加显著。

如今,激光技术已经在工业、农业、医学、军工、科学研究以及人们的现代生活中得到了广泛应用。从激光微细加工到激光核聚变,从视听装置、激光通讯到捕捉、跟踪、测量飞行目标,从激光育种到激光美容,激光技术都大有用武之地。

作为高技术重要组成部分之一的激光技术,是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重要支柱之一。其发展不仅受到技术先进国家的高度重视,而且也受到许多发展中国家的高度重视,并给予高强度的投入。80年代以来,不少国家政府都把激光技术列入国家级发展计划。例如,美国的“激光核聚变计划”、

德国的“激光 2000”、英国的“阿维尔计划”、日本的“激光研究五年计划”等等。这些计划的实施使激光技术得到迅速发展,并且已经形成了一个生机勃勃的新兴产业。同时,激光技术的发展大大促进了多种学科、多种技术和多种生产水平的进步和提高,其影响之大,举世瞩目。

## 2. 激光技术应用发展的过程

这一过程大致可以分为以下三个阶段:

第一个阶段(1960~1970年)是发展激光器品种、提高激光器性能、探索应用的阶段。没有形成产业,没有形成批量商品,只有实验装置和研制样机。在这个阶段,军事应用的研究开发占很大比重;

第二个阶段(1970~1980年)在应用探索中有重大突破,最重要的是低损耗光纤的突破、激光制导炸弹和火炮激光测距机、激光加工实用化等等。

第三个阶段(1980到现在)是激光应用辉煌的阶段。主要是指在信息领域的应用得到全面扩展,并形成相当规模的激光光电子产业。

## 3. 经济效益和社会效益显著

激光技术具有很广又很强的渗透性。激光应用于检测、测距、准直,可大大提高测量精度和自动化程度,使其在机械、建筑、冶金、汽车、石油和国防等领域得到了广泛应用。美国原国家标准局曾预测:工业检测任务的百分之九十将由激光和光电检测来完成。激光应用于通讯,使通讯技术产生了质的飞跃;激光应用于信息储存,已使视听技术发生了重大变革;激光分色、打印促进了印刷技术的发展;激光应用于医学,已可治疗 110 多种疾病,具有独特的效果,是其它医疗器械无法比拟的。

激光应用于材料加工,如打孔、切割、焊接、热处理、打标和微加工等,解决了许多常规方法无法解决或很难解决的难题,大大提高了工作效率和加工质量,被誉为未来制造系统共同的加工手段。在发达国家的加工业中,已逐步进入“光加工”时代。日本估计到 2000 年激光加工将占整个加工业的 10%。据统计,国外已有 3 600 多台工业激光器在汽车生产中应用,如仅西门子公司的一部分在流水线上就采用了 400 多台激光器。单是激光点焊代替电阻焊,每辆轿车就可节省 56kg 金属,而且还可减少大量燃油消耗,经济效益和社会效益十分可观。应用激光毛化技术毛化轧辊比喷丸毛化轧辊的寿命提高三倍,同时还提高了轧板的质量。在国外,激光毛化板比喷丸毛化板的售价高 15% 左右,可见其效益十分可观。我国在 60 年代中期开始就在钟表行业的宝石轴承加工中采用激光打孔,现累计产值已达 22 亿元。

不难看出,激光技术应用所取得的效果是显著的,应用前景是十分广阔的。

## 第 2 节 国外激光加工技术发展概况

### 1. 概述

迄今为止,美国、欧洲和日本等工业发达国家的激光加工已经形成了一个新兴的高新技术产业。工业激光器、激光加工机的销售额逐年递增,已有的应用领域规模不断扩大,新的应用领域在不断开拓,展现出了良好的发展势头。这一切是因为工业激光器已商品化,加工技术已经成熟,有关的政府和企业界都极为重视发展这一产业,在实际应用中已为发展高科技和攻克尖端技术以及解决许多关键难题做出了重要贡献。

目前的世界工业激光产业市场形势基本上是美国、西欧和日本三足鼎立,他们大致占有相同的市场份额。

### 2. 激光器市场

目前,激光加工用主要是 CO<sub>2</sub> 激光器和 YAG 激光器。

CO<sub>2</sub> 激光器市场上大约有 35 家公司比较活跃,其产品已形成了商品化和系列化。0.5~1kW、1~2kW、2~5kW、5~25kW 各档次的激光器应有尽有,其销售额每年均以较高速度增长。

### 3. CO<sub>2</sub> 激光加工机

用于激光切割、激光焊接和激光热处理的 CO<sub>2</sub> 激光加工机品种齐全,从二维工作台到六维工作机器人,从单一的加工到两种以上的复合加工,如激光切割-冲孔复合机(简称激光冲压機——Laser Press)样样都有。

### 4. 激光加工应用市场

应用市场是广阔的。汽车工业是激光加工技术的最早也是最大用户。从轿车底板的激光拼焊、顶棚的激光焊接、覆盖件三维轮廓的激光切割到汽车双联轴齿轮激光焊接、转向器壳体的激光淬火等,都有大量的应用。

此外,在激光加工服务方面,美国约有 800 家激光加工站(Job Shop),欧洲约有 900 家,日本约有近 1 000

家，其规模大小不等，有的只承担单一工种的加工，有的则可承担各种要求的加工。总之，不论属于哪种加工，都是激光加工产业中的重要组成部分。更值得提出的是，所有这些激光加工站都具有良好的经济效益以及很强的生命力。

### 第3节 我国激光加工技术研究与应用概况

#### 1. 激光打孔的早期应用

同国外发展情况相同，我国在材料激光加工领域的应用也是始于激光打孔。1963年研制成功激光打孔机，1965年正式在拉丝模和手表宝石轴承上采用激光打孔，以后相继采用CO<sub>2</sub>激光器、钕玻璃激光器、YAG激光器对不同材料、不同零件进行打孔。

#### 2. 激光切割的早期应用

1976年，由中科院长春光机所、长春第一汽车制造厂轿车分厂等单位合作研制的CO<sub>2</sub>激光切割机成功的应用于“红旗”牌轿车覆盖件的切割上。其后，成都132厂等单位也成功的采用了激光切割。

#### 3. 激光热处理的早期研究试验

随着大功率CO<sub>2</sub>激光器的研制成功，使激光加工应用领域不断扩大，激光热处理的研究、开发与应用就是其中一例。美国通用汽车公司所属的萨基诺(Saginaw)厂于1973年筹备，1974年9月将汽车操纵器外壳的激光热处理正式应用于生产上。

我国科技工作者对这一发展动态极为关注，并编写出若干小册子、译文集等，对国外情况加以介绍。中科院长春光机所从1978年开始，采用本所研制的500W CO<sub>2</sub>激光器对工业上常用的数种金属材料进行了较为系统的激光热处理研究试验。1979年4月，由中国机械工程学会热处理学会在杭州召开的第二届全国年会上，宣读了“钢与铸铁的激光热处理”研究报告，引起了与会专家和代表的广泛关注。

几乎在同一时期，铁科院金化所、中科院力学所同北京机电研究院、长沙铁道学院、中科院上海光机所同重庆大学和西安交大、华中理工大学、天津纺织工学院、天津激光所、上海激光所、北京11所等单位（或几个单位合作）先后开展了激光热处理的研究试验。参加单位和人员之多，规模之大，在同一时期即使是国外也是无法与之相比的。我国在激光热处理这一领域做了许多比较深入、系统的研究试验工作，取得了丰硕的科研成果。同时，以缸套-活塞环这对应用量大、面广的磨擦付为重点，开展了激光热处理工业应用试验工作，并取得了可喜的成果。这种态势形成了我国激光加工技术早期应用中的一个鲜明特色！

#### 4. 激光加工技术交流活跃

(1) 第一次全国性专业会议。受全国热处理学会委托，由中科院长春光机所和吉林省机械工程学会主办，于1980年10月在长春召开了“全国电子束与激光束热处理学术交流会”。本次会议的特点是：参加会议的人数多，提交会议的论文数量却较少。这一情况说明了当时对此感兴趣的人多，有条件开展工作的少。

(2) 相关专业学术组织相继成立。为了推动学术交流，全国热处理学会下面增设了“高能密度热处理技术委员会”，中国光学学会下面增设了“激光加工技术专业委员”。

(3) 定期举行学术交流活动。由上述两个专业委员会每两年各自或联合召开学术会议，所以我国平均每年都召开一次全国性的专业会议。

#### 5. 国家高度重视发展高技术产业

(1) 被列入国家重点科技攻关计划。1982年10月，由国家科委基础研究与新技术局（即现在的基础研究高技术司）和中国光学学会激光专业委员会在上海联合召开了“全国激光工业应用研讨会”。根据与会代表们的意见，这次会议决定建议将激光热处理列入国家“六五”科技重点攻关内容，并很快被采纳。1983年3月，“全国激光热处理学术交流与攻关方案论证会”在武汉召开，包括激光器和激光热处理工艺等若干个项目通过了方案论证，正式列入“六五”攻关课题。从“七五”攻关开始，就将单一的激光热处理攻关扩展为激光加工技术（包括打孔、切割、焊接等）的攻关。“九五”攻关则以实现产业化为重点目标。经过几个五年计划的连续攻关，已经获得了丰硕成果。

(2) 被列入其它国家级发展计划。激光技术应用除被列入国家重点科技攻关外，它在国家自然科学基金、国家“863”计划、国家“火炬”计划等也有相当的项目被列入，可见国家对在我国发展应用激光技术是相当重视的。通过几年的努力，在上述计划内，已在这一领域取得了可喜成果。