



普通高等教育规划教材
港口机械电子工程丛书

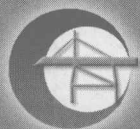
激光制造技术基础

(机械工程专业)

洪 蕾 编著
吴 钢



人民交通出版社
China Communications Press



普通高等教育规划教材
港口机械电子工程丛书

激光制造技术基础

(机械工程专业)

洪 蕾
吴 钢 编著

ISBN 978-7-114-06960-7
I. 激... II. 洪... III. 激光加工 IV. TG62
中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第003144号
激光制造技术基础 / 洪蕾, 吴钢编著. — 北京: 人民交通出版社, 2008
ISBN 978-7-114-06960-7
I. 激... II. 洪... III. 激光加工 IV. TG62
中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第003144号
激光制造技术基础 / 洪蕾, 吴钢编著. — 北京: 人民交通出版社, 2008
ISBN 978-7-114-06960-7
I. 激... II. 洪... III. 激光加工 IV. TG62
中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第003144号

人民交通出版社

内 容 提 要

激光加工技术是综合光、机、电、计算机等为一体的高新技术,近年来迅速发展,得到日益广泛的应用。本书全面概括介绍了激光加工技术的基础知识和当前主要的激光加工应用技术,并展望了未来发展方向。本书共分为九章,系统阐述了激光物理基础、激光加工设备、激光与物质的相互作用、激光切割、激光焊接、激光相变硬化、激光熔覆以及其他一些激光加工技术等内容。本书可作为材料加工领域的高年级大学生、研究生的教材,也可供有关专业的科研工作者、工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

激光制造技术基础 / 洪蕾, 吴钢编著. —北京: 人民交通出版社, 2008. 2

ISBN 978 - 7 - 114 - 06969 - 7

I. 激… II. ①洪… ②吴… III. 激光加工 IV. TG665

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 009144 号

书 名: 激光制造技术基础

著 者: 洪 蕾 吴 钢

责任编辑: 钱悦良

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011) 北京市朝阳区安定门外外馆斜街 3 号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010) 85285838, 85285995

总 经 销: 北京中交盛世书刊有限公司

经 销: 各地新华书店

印 刷: 廊坊市长虹印刷有限公司

开 本: 787 × 1092 1/16

印 张: 21.5

字 数: 541 千

版 次: 2008 年 2 月 第 1 版

印 次: 2008 年 2 月 第 1 次印刷

书 号: ISBN 978 - 7 - 114 - 06969 - 7

印 数: 0001 ~ 2000 册

定 价: 40.00 元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

前 言

激光加工技术在加工精度、效率、可靠性、自动化等各方面都具有无可比拟的优越性。近年来,随着大功率、高性能激光加工设备的不断研制成功,激光加工技术在日本、美国、英国、德国等发达国家的汽车、能源、电子等工业领域得到快速发展,激光加工被认为是21世纪最有发展前景的制造技术之一。

当今工业生产中,零件材料与结构的不断更新,生产模式的逐步转变,为激光加工技术带来了巨大的应用潜力。经过多年的基础与应用研究,激光加工技术已具有更高的适应性、更强的加工能力以及更先进的质量监测手段,并在许多行业逐步替代一些传统工艺。

本书的宗旨是希望读者能更深层次地了解激光加工技术及其发展,对现代激光加工设备和工艺的选择与优化提供帮助。全书系统地介绍了与激光加工技术相关的知识。前四章着重介绍激光加工技术的基础理论,包括激光光束的基本物理特征、激光器工作原理及其特性、激光与材料之间的相互作用等。后五章对现代激光切割技术、激光焊接技术、激光相变硬化技术、激光熔覆技术以及其他一些激光加工技术等进行了全面的介绍。本书注重讲解激光加工技术的基本原理与工艺特点,同时将前沿的激光加工研究成果展现给读者,希望大家能对激光加工技术有一种全新的认识。

本书强调统一性、系统性、新颖性和协同性,重点章节又保持相对独立性和可读性,概念清楚、图文并茂、由浅入深、循序渐进,具备材料加工基础知识的读者即可入门。

本书可作为机械工程专业材料加工领域的高年级大学生、研究生的教材,也可供有关专业的科研工作者、工程技术人员参考。

本书由洪蕾博士对全书结构和内容进行了规划与统稿,并撰写了前六章,后三章由吴钢博士撰写;宋光明教授对全书进行了审定。书中部分插图引自公开发表的文献和专著,在这里对原作者表示致谢。

与本书内容有关的研究工作,作者得到了上海市重点学科建设项目(T0601)、上海市机械设计制造及其自动化教育高地建设项目、上海市高等学校科技发展基金重点项目(07ZZ101)和上海市科技启明星项目(07QA14027)等的资助。在本书撰写过程中,作者亦得到了宓为建教授的指导与帮助,在此一并表示感谢!

鉴于作者水平有限,书中疏漏之处在所难免,敬请读者提出宝贵的意见和建议。

作 者

2007年10月于上海

目 录

第一章 绪论	1
第一节 激光技术应用领域	1
第二节 激光加工技术	6
第三节 激光加工技术在工业中的应用	14
参考文献	19
第二章 激光物理基础	21
第一节 激光产生的机理	21
第二节 决定激光与物质相互作用的激光光束特性	27
第三节 光束的传输与聚焦	44
第四节 激光加工常用激光技术	59
参考文献	67
第三章 工业用激光加工设备	69
第一节 激光器简介	71
第二节 二氧化碳激光器	78
第三节 掺钕钇铝石榴石激光器	93
第四节 飞行光路	97
第五节 激光光学元件和系统部件	99
参考文献	102
第四章 激光与物质的相互作用	103
第一节 物质对激光的反射和吸收	103
第二节 激光对固体材料的热效应	114
第三节 光致等离子体	129
参考文献	134
第五章 激光切割技术	135
第一节 概述	135
第二节 激光切割过程中能量的分析	139
第三节 激光切割质量控制	141
第四节 常用工程材料的激光切割	158
参考文献	164
第六章 激光焊接技术	165
第一节 概述	165
第二节 激光焊接的熔池、匙孔效应及等离子体行为	170
第三节 影响激光焊接质量的主要因素	178

第四节	典型材料的激光焊接	193
第五节	激光焊接技术的发展及其前景	200
	参考文献	205
第七章	激光相变硬化技术	207
第一节	概述	207
第二节	激光相变硬化理论基础	212
第三节	相变硬化层模拟	231
第四节	改善硬化层分布均匀性的方法	235
第五节	激光相变硬化优化控制基础	239
第六节	齿面激光相变硬化工艺	252
第七节	激光相变硬化研究展望	256
	参考文献	256
第八章	激光熔覆技术	259
第一节	概述	259
第二节	激光熔覆基础	263
第三节	熔覆层裂纹及其控制	287
第四节	激光熔覆过程的数值模拟	296
第五节	激光熔覆技术的应用与展望	300
	参考文献	302
第九章	其他激光加工技术	305
第一节	激光微细加工	305
第二节	激光原型制造	320
第三节	激光表面工程	327
第四节	激光标刻	333
	参考文献	335

第一章 绪 论

第一节 激光技术应用领域

激光技术是 20 世纪 60 年代最重要的科技成就之一,它的出现,几乎对整个科技领域的发展都起了重大的改革和推动作用。以美国、日本、德国为首的工业发达国家非常重视激光技术的发展与应用,把激光技术列入国家级发展计划中,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,形成了如德国的通快公司(Trumpf),美国的相干公司(Coherent)、Synard 公司等世界知名激光公司。俄国对发展激光技术也奋起直追,制定和提出“激光技术服务于俄罗斯经济”国际专项纲要,重点支持在 1996~2005 年“国家技术库”联邦专项纲要中设立“发展光电子和激光技术”专项。

激光以其亮度高、方向性好、单色性好、相干性好等特有的光学特性,已与多个学科相结合形成多个应用技术领域,如信息光电子技术,激光医疗与光子生物学,激光加工技术,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,激光分离同位素,激光可控核聚变,激光武器等。

一、工业材料的加工

激光通过透镜聚焦后,可形成直径几微米的激光束,达到很高的能量密度,与被加工的材料相遇会产生极强的热效应,因而可对材料进行打孔、切割和焊接等。激光加工属于无接触加工,工件不会变形和磨损,加工时间短、质量高。如进行钟表宝石轴承的打孔,每秒钟可打孔 10 余个,成品率可达 95% 以上;而机械打孔的工艺复杂,速度慢,成品率只有 80% 左右。用激光来切割,缝隙窄,切割边缘整齐,热影响区域小。激光既可以切割硬度很大的合金钢,又可以切割很脆易碎的石英、陶瓷,还可以切割柔软的塑料、布匹。目前对半导体硅片的切割常采用激光。激光还可用来焊接高熔点和易氧化的金属,并能将不同的材料(如金属和非金属)焊接在一起。激光焊接还有一特殊优点,即可透过玻璃对密封的工件进行焊接加工,成为制造电真空器件的优良手段。激光还可对金属表面进行热处理,比传统的热处理方法优越得多。这种方法速度快,变形小,硬度均匀,硬化深度可精确控制。被处理过的金属表面产生一层类似玻璃状的保护层,起到很好的防腐蚀性。

二、激光测距

1. 人造卫星激光测距(SLR)

人造卫星激光测距(SLR)是 20 世纪 60 年代中期出现的一种高精度空间测量技术,其原理是通过测定激光脉冲至带有反射器的激光卫星往返飞行时间,从而精确测定卫星位置和轨道,进而计算测站地心坐标、测站间基线长度、地球自转参数、地球重力场系数和引力常数等,为建立全球地面参考系、监测现代地壳运动提供高精度观测数据。

上海天文台的第三代卫星激光测距系统建立于1986年,主要由60cm口径的望远镜、自滤波锁模激光器、高精度时间间隔计数器和时频系统等部分组成。由于采用了先进的单光子雪崩二极管接收器,以及卫星跟踪和测量过程由计算机自动控制,使测量精度大大提高。目前这台仪器可测量的最大距离是2万公里,精确度为1.5~2cm。

经过多年努力,1998年上海天文台的SLR系统在国内第一个实现了白天激光测距,达到了世界先进水平,从而不仅使观测数量增加一倍,还能保证所有卫星轨道都能取得观测资料,对提高定轨精度及应用研究极为重要。

上海天文台SLR站是中国SLR联测网的负责单位,也是国家大科学工程“地壳运动观测网络”的重要观测基地之一,同时与国外SLR站有着密切的合作关系,是国际激光测距服务(ILRS)和西太平洋激光跟踪网的重要组成部分(图1-1)。



图1-1 上海天文台60cm卫星激光望远镜

2. 半导体激光测距仪

半导体激光测距仪(图1-2)广泛用于建筑工程和家庭居室的测量,可将测量结果记录于仪器的内存中,并计算出面积和体积,红色激光指示使仪器操作更为方便,测程0.2~100m,精度3mm。

三、激光通信

激光通信和无线电通信相比,具有以下一些优点:第一,频带宽,通信容量大。光波的频率是 $10^{13} \sim 10^{15}$ Hz,比无线电波高 10^5 倍,比微波也高近 10^4 倍。理论上计算,光通信容量可以传输100亿路电话或1000万套电视节目。因技术上的种种原因,目前实际一对光纤可以通几千路电话。由于一根光纤很细,可以由几十根或更多根光纤组成光缆,因此可以达到很大容量(图1-3)。第二,抗干扰性强。外界的电磁波因与光波频率范围不同,所以不会干扰光通信。第三,设备结构简单,投资少,使用寿命长。第四,采用光导纤维传输激光信号比用有色金属导线传输电信号成本低30%,可以节约大量金属材料。正因为激光通信具有以上一些优点,所以在通信领域起着越来越重要的作用,加快了人类进入信息时代的步伐。

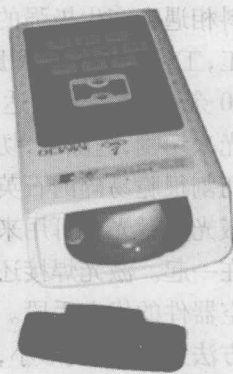


图1-2 半导体激光测距仪

四、激光信息存储与处理

激光除了可以传输信息外,在储存信息方面也具有重要作用,如全息照相、光学计算机、光

盘等。以往的光学图像只能记录光的强度,利用激光既可以记录光的强度又可以记录光的相位,即可以记录光的全部信息,因此称为全息照相,照出的图像是立体的。利用激光的相干性,人们正在研究光学计算机。光学计算机与电子计算机相比,具有运算速度快、信息容量大的优点。它的信息处理过程接近于人眼和大脑的观察与识别外界事物的过程。光盘即激光视盘,是利用激光储存信息的“唱片”。它是由两片透明塑料组成,塑料片上涂有一层反射膜。光盘的厚度约1mm,直径为20~30cm,两面都可使用。用光盘播放时,首先由半导体激光器发出激光,一台小型计算机控制激光来扫描,得到以数字形式输入的脉冲信号,再由计算机转换成电视信号传给电视机。用光盘播放的音像质量高,使用寿命长,而且光盘中记录的每幅图像都有编号,可以任意选取,非常方便。



图1-3 激光的光纤传输

五、激光医学和激光生物学

医学是应用激光技术最早、最广泛和最活跃的一门交叉学科。1961年红宝石激光视网膜凝固机在眼科首次应用。到目前为止,临床上使用的激光医疗设备已有几十个品种,包含了紫外—可见光—红外的各种波长,包含了连续、脉冲、巨脉冲、超脉冲等各种输出方式;激光医疗所涉及的范围几乎包括了临床所有科室和专业,治疗的病种达数百种,对有些疾病,激光治疗已被列入首选方法。

激光在医疗中所起的作用是一个复杂的物理、化学及生物过程,由于波长、能量、作用方式的不同,对病变组织产生各种不同的效应,分述如下:

1. 激光的热效应

利用高能量激光被组织吸收后产生高热,瞬间可达几十度到几百度,使病变组织凝固、汽化、碳化,是激光医疗的主要方面。如:激光凝固治疗视网膜裂孔、中心性浆液性视网膜脉络膜病变、糖尿病视网膜病变等眼底病变,激光凝固汽化治疗各种体表或内腔良恶性肿瘤,激光心肌血管重建术。其他如外科、妇科、五官科等手术科室的激光手术治疗等。激光手术具有方法简便易行,出血少或不出血,术后感染和后遗症较少等优点,特别对肿瘤,激光的高热可直接破坏肿瘤细胞,同时封闭血管和淋巴管,阻断了肿瘤转移的途径。

2. 激光的非热致汽化效应

紫外波段激光的高光子能量,可以打破生物分子的化学键导致组织的汽化,或短脉冲激光产生的冲击波,可以将病变组织击碎。以上两种作用主要不是热效应,基本没有热积累和对周围组织的损伤,适合进行一些精细手术,如:激光冠状动脉成形术,激光角膜成形术,激光虹膜打孔术,激光治疗文身,激光碎石术等。

3. 激光的光化学效应

细胞或组织内含有的内源性或外源性光敏物质,经适当波长的激光辐照后,产生特定波长的荧光或细胞毒素,前者可作为恶性肿瘤的定位诊断,后者可作为恶性肿瘤的治疗。这种方法称为光动力学疗法,可以单独使用,也可与激光汽化、手术、放疗、化疗等方法合并使用。国内外学者对多种体表和内腔肿瘤进行治疗的结果表明,光动力学疗法是一种有前途的可供选择的恶性肿瘤治疗方法。近年来我国学者将光动力学疗法用于治疗鲜红斑痣,获得良好疗效。

4. 激光的生物刺激效应

低强度激光经大量实验及临床研究证明,可以调节机体多种功能,如:神经传递、免疫、代

谢、酶的活性、组织修复等功能,低强度激光辐照后通过改善上述功能以治疗疾病。目前临床上常用的治疗方法主要有激光针灸、激光理疗、激光血管内照射疗法三种。低强度激光的临床治疗几乎包括了常规针灸和理疗的全部病种,特别是对一些急、慢性炎症,疼痛,慢性溃疡及创伤的愈合等有显著疗效,激光血管内照射疗法对某些系统性疾病,有增强体能,缓解症状的作用(图1-4)。



把装着光纤的导管插入病人鼻腔内,靠光纤所发射的激光,与一种化学物质起作用,杀死癌细胞

图1-4 利用激光杀死病人鼻咽细胞

六、激光军事应用

有目共睹,激光在军事上的应用已经改变了世界。激光在军事上的应用涉及了雷达、测距、定向能武器、导弹、航空航天、电子对抗等方面。除军事应用外,这些技术也能同样应用于民用。

1. 激光武器

激光最吸引人的军事应用,当属于激光武器。由于强激光束具有很强的烧蚀作用,因而可以破坏制导系统、引爆弹头和毁坏壳体、拦截制导炸弹、炮弹、导弹、卫星、飞机、巡航导弹和破坏雷达、通信系统等。激光摧毁卫星可由地面、空中和空间进行。激光武器的威力强大,命中率极高,是真正意义上的“杀手铜”。科幻电影中的激光武器反映了激光武器的远大前程。目前美国已研制出机载和车载激光武器。

当激光能量不高时,主要使敌方人员致盲和使某些光电测量仪器的光敏元件受到破坏甚至失效,或可用来在城市、森林大面积点火。著名的英国—阿根廷马岛战争中,英国就曾经使用了激光武器对付阿方飞机,导致飞行员失明而机毁人亡。在反坦克、反潜艇中,激光致盲武器也有很大发展潜力,对准潜望镜入口发射激光,就会把在用潜望镜观看外部情况的指挥员、驾驶员的眼睛损伤,坦克和潜艇也就失去作战能力。侦察卫星靠装在其中的各种光电传感器侦察地面目标,如果用激光束照射其中的光电传感器也会使侦察卫星变为“瞎子”。

2. 激光制导

激光制导具有投掷精度高、捕获目标灵活,导引头成本低、抗干扰性能好、操作简单等优点。其主要制导方式有半主动制导、主动制导、波束制导。激光制导可同时攻击多个来袭目标,即把激光信号经过编码以数个指示器分别控制数枚导弹,打击来袭目标。为提高激光制导全天候作战能力,各国都在研制先进的激光目标指示器,以保证昼夜作战使用。目前激光制导技术的发展趋势:制导体制仍以半主动寻的制导和波束制导为主;发展高性能目标捕获跟踪和激光指示系统,提高武器系统的抗干扰能力和生存能力;开发小型化激光雷达导引头,以实现“打了不管”能力的激光自主制导; CO_2 激光频段的制导有取代YAG制导系统的趋势,特别是 CO_2 雷达成像技术;发展双式多模制导系统等。各军事大国都已有大量激光制导武器装备部队,海湾战争再一次让我们见识了激光制导的作用与威力。

3. 激光测距与激光雷达

激光测距与普通测距相比,具有远、准、快、抗干扰、无盲区等优点。激光测距在常规兵器中已广泛应用,正在逐步取代普通光学测距手段。

雷达分辨率与波长有关,波长越小,分辨率和精度越高。激光雷达在高精度和成像方面占

有优势,其分辨率可达厘米甚至毫米级,比微波雷达高近 100 倍;测角速精度,理论上比微波雷达高 1 亿倍以上,现在已做到高 1000 ~ 10 000 倍。军用激光雷达最成功的应用是辅助导航,特别是速度计。激光速度计可给机载导航计算机提供超精度测量,其测速误差可达 0.5 mm/s。激光雷达最适于远距离高分辨率成像。20 世纪 90 年代初林肯实验室改造“火他”CO₂ 激光雷达,成功地跟踪 800 km 外的载人飞行器诱饵的多普勒图像。随后又研制了一台 ND: YAG 激光雷达,也精确跟踪了火箭和卫星。

4. 激光陀螺

激光陀螺利用光的多普勒效应来精确测量飞行器、舰船的速度,从而实现导航。相比普通机械陀螺,激光陀螺精度提高了上百倍,而且体积更小。激光陀螺广泛应用于导航、定位及航空航天中。我国正在建造激光陀螺生产线。

5. 激光侦察对抗

激光侦察在军事上占有十分重要的地位。利用激光技术进行多光谱摄影(全息摄影),可以识别伪装目标。由于各种物体对各种光的吸收和反射能力不同,可以在底片上引起不同感光反应而实现对目标的侦察。海湾战争中,美国利用这一技术,发现了伊拉克严密伪装在树林里的坦克和导弹发射架。

激光对抗可对激光测距进行欺骗,使其无法测定其真实距离或使导弹改变弹道。激光对抗还可对激光进行干扰。

七、激光雕刻

如激光雕刻地形印章盒,即采用先进的激光雕刻工艺,在高级胡桃木、花梨木材料上进行雕刻加工而成(图 1-5)。整套产品外形设计为湖北、武汉、上海、苏州、北京、广州、深圳等省市地图,内部则是镂空雕刻,边角细腻圆润,精致大方,是馈赠宾朋及收藏自用的工艺佳品。

八、激光化学和同位素分离

激光应用于化学,可以加快化学反应的速度,起到“超强催化剂”的作用。同时,在激光的激励下,某些本来很难发生的反应也成为可能。因此,激光化学为材料工业和化学带来了革命,能够生产某些新型的材料,同时降低很多材料的成本。激光应用于原子物理,可以帮助科学家们实现同位素分离、原子核电子分离等过程,为人类进一步探索未知世界提供了有力的手段。

九、激光引发核聚变

原子核中蕴藏着大量的能量,如果能够成功利用,人类将永远不用为能源发愁,这就是人类苦苦探索惯性约束聚变(ICF)的原因。在探索过程中,人们遇到了一个困难,那就是如何实现点火、如何约束反应室中心高温高压高密度的等离子体。由于靶丸极小,而反应室温度极高,常规手段根本不能用于激励和约束它。由于激光具有的独

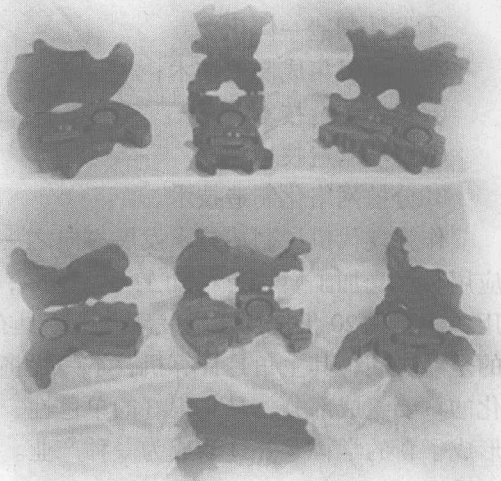


图 1-5 激光雕刻地形印章盒

特性,成为了解决这一难题不可替代的手段。利用高能量密度的超短脉冲激光作用于靶丸,可以实现装置的点火,同时利用激光产生的强大光压,可以将等离子体约束在反应室中心。目前,美国等已经在这方面取得了很多突破性的进展,我国的“神光”系列也已经取得了一大批世界领先的成果。不久的将来,激光一定会为我们带来取之不尽,用之不竭的能源。

总而言之,激光技术几乎渗透到科研、军事、医疗、农业、工业、环保等各个领域,应用日益广泛,激光在信息领域的应用尤为突出,激光正培植和孕育着新的学科、新的产业。

第二节 激光加工技术

一、总论

世界各国在经济上的竞争主要是科学技术的竞争。在各个国家的企业生产力构成中,制造技术的作用往往占 60% 左右。日本的发展,亚洲四小龙的发展,在很大程度上都是依靠他们重视制造技术。这些国家十分重视通过制造技术,将世界各国的发明形成产品,促使其经济的发展和国力的增强。

作为已经发展了 100 多年的制造业,其进一步的发展必须依靠信息科学和材料科学来改造自己,同时信息科学、材料科学也必须依靠制造技术来取得新的发展。例如,在计算机技术的发展中,最关键的问题是高密度、大规模集成电路与大容量存储器的制作,它们均取决于制造设备的先进程度,受制于制造技术的发展。因此,对制造业的认识有两个方面:一方面认为制造科学与信息科学、材料科学、生物科学一起被列为新时代四大支柱科学之一,另一方面机械制造业是集机械、微电子、计算机、光学、信息科学、材料科学、生物科学、管理科学等最新成就后形成的一个新兴技术与新兴产业,即现代机械制造技术。

现代机械制造技术的发展方向如下:

- ①传统制造技术的发展和完善;
- ②特种加工技术的发展;
- ③制造自动化系统(尤其是柔性制造技术)的发展;
- ④设计制造一体化;
- ⑤计算机集成制造技术;
- ⑥虚拟制造技术;
- ⑦智能制造技术;
- ⑧分散网络化制造技术。

作为现代机械制造技术发展方向之一的特种加工技术,在工业领域得到了广泛的研究和应用。激光加工属于特种加工技术之一,已在国内外进行深入研究,并得到了较广泛的应用。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。激光是光机电一体化的重要组成部分,具有很好的单色性、相干性和高能量密度,它已渗透到各个学科领域,形成了新的学科,并逐渐成为一种产业。而这些产业正在作为新的经济增长点越来越受到高度重视。

在激光技术的广泛应用中,激光加工是其中最大的一个应用领域。激光因具有单色性、相

干性和方向性三大特点,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,在国外激光享有“万能加工工具”的美称。随着各国对激光加工技术研究的深入,特别是大功率激光器的开发成功,激光加工技术在发达国家已得到广泛应用,并产生巨大的经济效益和社会效益。高功率激光加工的发展水平也成为衡量一个国家高科技应用和工业发达程度的重要标志之一。激光加工技术的发展,必将引起一次新的工业革命。

激光加工技术是对传统加工技术的革命,随着我国经济的迅速发展和产业的升级以及激光技术的不断推广应用,激光产品将有非常广阔的市场前景。

光电子技术方面是我国与国际水平差距较小的一个领域,与发达国家几乎同时起步。1960 年,世界第一台红宝石激光器问世,第二年,我国第一台红宝石激光器就研制成功了。此后我国激光技术迅速发展,特别是在改革开放后,以激光为特色的光电子信息产业作为一支产业新军迅速崛起。专家们认为,在激光科研领域我国并不落后,可以说,国外已有的激光技术,我国也都研究开发过,但真正达到应用的还不多,特别是在微电子、汽车、机械制造这些领域,激光技术还没有发挥出应有的作用。激光加工作为信息时代的一种新型加工工艺,对提高产品质量、劳动生产率、自动化、无污染、减少材料消耗等起到愈来愈重要的作用,既得到其他高新技术发展的有力支撑,又受到社会经济迅速发展强烈要求的牵引,正保持着强劲的发展势头。总之,激光加工是 21 世纪最具竞争力的先进加工技术,它的发展前景是十分广阔的。

我国科技部提出的“十五”激光项目设想是,把握激光技术发展中的新机遇,利用产业结构调整 and 科研体制改革带来的有利条件,以激光加工技术为重点,在“攻关键技术、抓示范应用、建推广体系”这三个有机结合的层次上,重点解决激光产业化的关键技术、重点制造业中急需的激光加工集成装备以及激光技术推广应用的服务体系等,使我国激光加工向高稳定、整体化、智能化、柔性化方向发展,进而促进传统产业技术升级和激光产业的发展。《当前国家优先发展的高技术产业重点领域指南》要求充分发挥激光加工技术在高科技领域产业化、支柱产业技术升级换代和传统产业及传统工艺技术改造过程中的促进作用。

二、激光加工原理

激光是一种应用面很宽的高新技术,或者利用其单色性,或者利用其相干性或方向性,或者利用其高功率密度。对于工业加工用激光,人们关心的主要是功率、波长(单色性)、空间—时间特性以及偏振性。

激光加工有热加工与“冷加工”之分,决定因素是光子能量的大小。光子能量与光波频率成正比,与其波长成反比。将激光束照射到金属或非金属工件上,被辐照材料将被瞬时熔化甚至汽化,以完成各种加工,这种基于热效应的加工称为热加工;某一类波长的激光束照射到聚合物一类的材料表面,则可产生光化学反应的刻蚀加工,这种加工称为“冷加工”。表 1-1 给出了加工常用激光器有关参数。

CO₂、CO 和 YAG 激光器均输出红外光,红外光的光波长而光子能量小。红外光子作用于固体物质,一般只能激发其振转能级,受激电子通过碰撞使晶格振动,导致被辐照物体温度升高,以至熔化或汽化,从而产生各种加工效果。在红外光作用下的激光加工过程本质上都是热作用过程,即这种激光是作为特种加热工具而使用的。

加工用激光器的主要性能

表 1-1

性能	CO ₂ 激光器	CO 激光器	YAG 激光器	准分子 (KrF) 激光器
波长 (μm)	10.6	5.4	1.06	0.249
光子能量 (eV)	0.12	0.23	1.16	4.9
输出方式	连续或脉冲	连续或脉冲	连续或脉冲	脉冲
调制方式	气体放电	气体放电	闪光灯或电光调 Q 或声光调 Q	气体放电
模式	基模或多模		多模	多模
发散角全角 (mrad)	1~3		5~20	1~3
总效率 (%)	12	8	3	2

准分子激光器则不同,它输出紫外光,其光子能量达 5eV,高于某些物质(如聚合物)分子的结合能。物质在紫外光光子的作用下可以发生电子能带跃迁,对于某些聚合物,还可以出现互斥的电子状态,打破或削弱分子间的结合键,从而实现对该种材料进行刻蚀加工。其作用机理是光化学作用,可以排除热影响,得到极高的加工质量。

如前所述,激光热加工,实际上是将激光束经过光学系统聚焦,形成合适光斑,提高其功率密度。当工件吸收光能后,瞬时升温,当温度适于金属材料产生相变时,移动光斑,由工件基体传热,形成淬火,等同于机械工业的热处理;当温度再升高,使工件被照射区域基体材料熔化,即可完成焊接;温度更高,使工件被照射区域基体材料达到汽化时,若辅以气体吹动,可完成切割、打孔工序。

三、激光加工技术的优异性能

激光具有亮度高、方向性强、单色性和相干性好等性能,加上激光的空间控制性(光束的方向变化、旋转、扫描等)和时间控制性(开、关、脉冲间隔)很好,易获得超短脉冲、尺度极小的光斑,能够产生极高的能量密度和功率密度,足以熔化世界上任何金属和非金属物质,特别适用于材料自动化加工,而且对加工对象的材质、形状、尺寸和加工环境的自由度都很大。与计算机数控技术相结合,激光加工系统为优质、高效和低成本的生产开辟了广阔道路,激光加工技术已成为工业生产自动化加工生产的关键技术,并具有普通加工技术所不能比拟的优势。激光加工,即通过控制光束与工件的相对运动,在一台机床上加工出孔槽、三维曲线、三维曲面等各种形状,完成钻、铣、镗等加工作业。它将引起机械加工的一场革命。激光切割、激光焊接、激光裁剪、激光成形加工(在激光束作用下使板料折弯)与激光辅助成形加工(在激光束作用下使板料等便于折弯)、激光辅助加工(激光加工与常规刀具加工相结合)、激光材料硬化、激光熔铸、激光快速找正、激光测量等技术的发展及应用,已获得了巨大的经济效益和社会效益。

激光加工为无接触加工,其主要特点也就是无惯性,因此其加工速度快、无噪声。由于光束的能量和光束的移动速度都是可以调节的,因而可以实现各种复杂型面的高精度的加工目的。且加工过程中无“刀具”磨损,对工件无“切削力”。

激光束不仅可聚焦,而且可以聚焦到亚微米量级,光斑内的能量密度或功率密度极高,用这样小的光斑可以进行微区加工,也可以进行选择性的加工。它不仅可以进行金属加工,还可以实现对非金属的加工,特别适合于加工高硬度、高脆性及高熔点的材料,如钻石打孔、金属切割。

由于光束照射到物体表面是局部的,虽然加工部位的热量很大、温度很高,但移动速度快,

对非照射的部位没有什么影响,因此,其热影响区很小。例如,在激光热处理、切割、焊接过程中,加工工件基本无变形,可省去或减少后继加工量。这一特点也可以成功地用于局部热处理和显像管的焊接。

激光加工不受电磁干扰。与电子束加工相比,其优越性就在于可以在大气中进行。在大工件加工中,使用激光加工比使用电子束加工要方便得多。

激光束易于导向、聚焦和发散,根据加工要求,可以得到不同的光斑尺寸和功率密度。通过外光路系统可以使光束改变方向,因而可以和数控机床、机器人连接起来,构成各种加工系统。这是一种极灵活的柔性加工系统,对于改造传统的机床和机器人是一种极好的方法。

与传统加工方法比较,激光加工有如下主要特点:

①加工手段多:在同一台机床上可完成切割、打孔、焊接、表面处理等多种加工;既可分步加工,又可在几个工位同时进行加工。

②适应性强:可加工各种材料,包括高硬度、高熔点、高强度及脆性材料;既可在大气中,又可在真空中进行加工。

③加工质量好:由于能量密度高和非接触式加工,并可在瞬时内完成,工件热变形极小,且无机械变形,对精密小零件的加工非常有利。例如,金属波纹管及密封继电器采用高频脉冲激光焊接,其气密性可达 5×10^{-10} Torr. l/s,比原工艺提高几个量级。

④加工精度高:例如对微型陀螺转子,采用激光动平衡技术,其平衡精度可达百分之一或千分之几微米的质量偏心值。

⑤加工效率高:例如在某些情况下,用激光切割可提高效率 20~80 倍;用激光进行深熔焊接时生产效率比传统方法提高 30 倍;用激光微调薄膜电阻,可提高工效 1 000 倍,提高精度 1~2 个量级;用激光强化电镀,其金属沉积率可提高 1 000 倍;金刚石拉丝模用机械方法打孔,要花 24h,用 YAG 激光器打孔,只需 2s,提高工效 43 200 倍。

⑥经济效益高:例如,与其他方法相比,激光打孔的直接费用可节省 25%~75%,间接加工费用可节省 50%~75%。

⑦节能和节省材料:激光束的能量利用率为常规热加工工艺的 10~1 000 倍。例如激光切割可节省材料 15%~30%。

⑧无公害和污染:激光束不会发生像电子束那样的 X 射线,而且无加工污染。

激光加工技术是集光学、机械学、电子学、计算机学等为一体的高技术,是激光应用最有发展前途的领域。目前已开发出 20 多种激光加工技术,如雨后春笋般地应用于各个新工艺领域,例如激光切割、激光打标、激光打孔、激光焊接、激光表面热处理、激光快速成型、激光清洗、激光冗余修正、激光退火、激光冲击强化等。激光加工技术的出现是对传统的加工工艺和加工方法具有重大影响的技术变革,很快被广泛应用于汽车、电子电器、航空、冶金、机械制造等国民经济重要行业,推动了工业的快速发展,并产生了巨大经济效益。

激光在材料加工中的应用主要包括表面处理(淬火、熔覆和合金化)、焊接、切割和打孔。不同的加工方式对激光器有不同功率密度和模式的要求,例如,对于金属表面的激光热处理,它只是对被辐照材料由表及里的温度升高,但维持固相不变,因此功率密度较低,大约 10^4 W/cm^2 ;如果金属激光焊接,要求材料表面要熔化,其液相—固相分界以一定速度向材料深部移动,则要有较高的激光功率密度,对于钢铁材料大约 $10^5 \sim 10^6 \text{ W/cm}^2$;如果对材料进行激光切割,则要求材料表面要汽化,显然要有更高的激光功率密度,例如 $10^6 \sim 10^8 \text{ W/cm}^2$ 。

国外激光加工已经形成规模产业,并以激光切割和焊接为主。以 2000 年美国市场为例,

激光加工中各种加工工艺所占市场份额如图 1-6 所示,其中切割约占 40%,焊接约占 20%,表面处理约占 10%,其他如标刻、打孔和微加工等占 30%。

1. 激光切割技术

激光切割技术作为一种新兴的加工方法,由于其具有加工灵活性和高效率、高质量的特性,在金属加工领域被广泛采用。激光切割的原理是利用高功率密度的激光束扫描材料表面,在极短时间内将材料加热到几千到上万摄氏度,使材料熔化或汽化,再用高压气体将熔化或汽化物质从切缝中吹走,达到切割材料的目的。

激光切割一般是应用在薄板材料的切割,例如开关板、仪表板,电梯的控制板、汽车车身覆盖件、大型电机的定子硅钢片、木模板以及各种非金属材料。激光切割要求激光器具有较好的光束模式,一般是采用 TEM₀₀ 模加偏振特性,这样功率密度高、切缝细且垂直。激光功率则根据板材厚度、切割速度来决定,因此功率范围较大,通常大部分都采用 500 ~ 2 000W 的高功率 CO₂ 激光器,板材厚度小于 10mm,均可满足要求。如果板材厚度大于 10mm 则要求更高的激光功率,例如切割 50mm 厚的钛合金板,则要求激光功率达到 15kW 以上。对于金属材料,在激光切割过程中一般采用辅助吹氧的方法,采用氧化反应熔化切割是降低切割成本、提高切割效率的有效方法,例如在吹氧切割钢板时,切割所需能量大约 60% 来自铁的氧化反应。而在吹氧切割钛合金板时,放热反应可能供 90% 的能量。

激光切割主要有以下特点:

- ①速度快,切口光滑平整,一般无须后续加工;
- ②切割热影响区小,板材变形小,切缝窄(0.1 ~ 0.3mm);
- ③切口没有机械应力,无剪切毛刺;
- ④加工精度高,重复性好,不损伤材料表面;
- ⑤数控编程,可加工任意的平面图形,不受图形复杂性限制,而且一般的数控加工机床加工幅面都很大,例如大恒公司引进的 PRIMA 公司的加工机床幅面为长 3m,宽 1.5m,这样可以对整板切割;
- ⑥无需开模具,经济省时,特别在如今“时间就是市场”的理念下,激光切割的优越性十分显著;
- ⑦激光可切割的材料很多,非金属方面可以加工有机玻璃、木板、塑料等板材,而金属方面可以加工不锈钢、碳钢、合金钢、铝板等多种金属材料。激光切割的质量要求主要有以下几个方面:切缝窄,热影响小,切割表面光滑,无切割熔渣,切边平行度好等。

激光切割技术可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。因此激光切割是高质量、高效率的一种加工方法,正因为如此,国外发展很快,在激光材料加工中,60% 左右是激光切割。

2. 激光焊接技术

激光焊接是把能量密度很高的激光束照射到工件上,使工件受热熔化,然后冷却得到焊缝。激光焊接具有溶池净化效应,能纯净焊缝金属,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,对高熔点、高反射率、高导热率和物理特性相差很大的金属焊接特别有利。激光束可以被聚得很细,光斑能量密度很高,几乎可以熔化所有的材料,因而它有广泛的适用

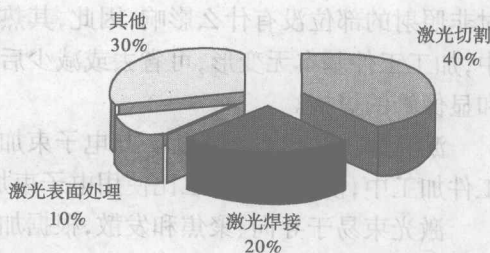


图 1-6 激光加工工艺所占市场份额

性;激光功率可控,易于实现自动化;激光束功率密度很高,焊缝熔深大,速度快,效率高;激光焊缝窄,热影响区很小,工件变形很小,可实现精密焊接;激光焊缝组织均匀,晶粒很小,气孔少,夹杂缺陷少,在机械性能、抗蚀性能和电磁学性能上优于常规焊接方法。

利用激光束可以进行各种焊接,例如点焊、对焊、搭接焊、角焊及T形焊等。由于激光束的方向性能好,能精确控制,采用合适的导向机构后,可以焊接出任意形状的焊缝。激光束不仅可以焊接一般钢铁及合金材料,还可焊接热导率大(铜、铝)和熔化温度高(钨、钼、钽)的金属。激光焊接是高速无接触焊接,因此将不会引起工件的热变形,也不会落入不良物质,从而提高了焊接质量。由于激光功率密度高,也可以进行深熔焊接。高功率CO₂激光器不仅能焊接一般金属,也能焊接一些特殊性能的材料,如舰艇用钢、钛合金及部分非金属(如陶瓷、石英和玻璃等)。正因为如此,激光焊接在电子、电气、汽车及钢铁等工业都获得了广泛应用。例如,集成电路外引线的焊接,电子枪的组件焊接,钽电池和钽电容的密封焊接,各种罐身的焊接,光纤的焊接,导线的焊接,汽车车身点焊,钢板拼焊,双联齿轮焊接,电机定子焊接等。

根据焊接的方式、材料的性质、焊接深度及焊接速度等因素,激光焊接应选择不同类型的激光器,功率也要求不同。例如点焊可以选择百瓦级的YAG固体激光器,缝焊一般采用1~5kW的高功率CO₂激光器,而深熔焊接则要采用10kW以上的高功率CO₂激光器。焊接用激光束模式要求比切割稍低,一般采用TEM₀₀+TEM₀₁(或TEM₀₁)即可满足要求。在激光焊接时一般要采用附加氢气和氮气来保护透镜,这样还可以减少金属表面的氧化。

3. 激光表面热处理技术

激光表面热处理是利用高功率密度的激光束对金属进行表面处理的方法,它可以对材料实现相变硬化(或称为表面淬火、表面非晶化、表面重熔淬火)、表面合金化、表面熔覆和激光“上釉”等表面改性处理,产生用其他表面淬火工艺达不到的表面成分、组织、性能的改变。激光具有极强的穿透能力,由其能量大小、功率密度强弱、作用时间长短而决定。当功率密度为10³~10⁷W/cm²时,以10³~10⁷℃/s加热速度把金属表面加热到仅低于熔点的临界转变温度,其表面迅速奥氏体化,然后急速自冷淬火,冷却速度可达1.7×10⁴℃/s,金属表面迅速被强化,这就是激光相变硬化。

激光热处理的显著特点是:高速加热、高速冷却,获得的组织细密、硬度高、耐磨性能好;淬火部位可获得大于4kN/mm²(400kgf/mm²)的残余压应力,有助于提高疲劳性能;还可以进行局部选择性淬火,通过对多光斑尺寸的控制,更适合其他热处理方法无法胜任的管孔、深沟、微区、夹角和刀具刃口等局部区域的硬化;激光可以远距离传送,可以实现一台激光器多工作台同时使用,采用计算机编程实现对激光热处理工艺过程的控制和管理,实现生产过程的自动化。

激光热处理的特点是加热快、工件热变形小。它既能对复杂形状的零件和零件局部进行处理(如盲孔、小孔、小槽及薄壁等),又可以对成本低廉的零件表面进行贵重金属的局部熔覆或合金化。进行激光热处理可以使用1~5kW多模的高功率CO₂激光器。

(1) 表面硬化或淬火

使铁基合金通过激光表面硬化产生马氏体,从而增加零件表面的耐磨性能和疲劳强度。例如在激光表面硬化的AISI1045钢样品中,表面硬度为55HRC,磨损10h后所产生的质量损耗为0.6~1.4mg;而在相同的试验条件下,未处理的同牌号钢的硬度仅为35HRC,质量损耗为4.8mg,经激光表面硬化后的样品耐磨性能提高3~6倍。在我国,激光表面硬化已广泛应用于汽车缸套、活塞环、曲轴、凸轮轴及铰杆等易损件中。特别是对小汽车缸套的热处理已取得