

激光制备 先进材料及其应用

JIGUANG ZHIBEI XIANJIN CAILIAO JIQI YINGYONG

刘其斌 徐鹏 著



冶金工业出版社

www.cnmp.com.cn

激光制备先进材料及其应用

刘其斌 徐鹏 著

北京

冶金工业出版社

2016

内 容 提 要

本书以激光技术在材料科学与工程中的应用为基础,详细论述了利用激光制备先进材料的方法。内容包括:激光与材料的交互作用;激光制备耐热耐蚀复合材料涂层;激光制备金属基复合材料耐磨涂层;激光制备梯度生物医学陶瓷材料涂层;激光制备形状记忆合金涂层;激光制备纳米材料;激光制备电子功能陶瓷;激光制备高熵合金涂层。

本书适于从事这一新兴领域的教师、工程技术人员及研究生和高年级大学生选用。

图书在版编目(CIP)数据

激光制备先进材料及其应用/刘其斌,徐鹏著. —北京:
冶金工业出版社, 2016. 5
ISBN 978-7-5024-7228-3

I. ①激… II. ①刘… ②徐… III. ①激光材料
IV. ①TN244

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016) 第 075571 号

出版人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp.com.cn 电子信箱 yjchs@cnmp.com.cn

责任编辑 郭冬艳 美术编辑 彭子赫 版式设计 彭子赫

责任校对 郑 娟 责任印制 李玉山

ISBN 978-7-5024-7228-3

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷

2016 年 5 月第 1 版, 2016 年 5 月第 1 次印刷

169mm × 239mm; 14.25 印张; 280 千字; 218 页

64.00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp.com.cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs.tmall.com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

前 言

激光材料加工是一种高度柔性和智能化的先进制造技术，被誉为“21 世纪的万能加工工具”，“未来制造技术的共同加工手段”。激光加工技术正以前所未有的速度向航空航天、机械制造、石化、船舶、冶金、电子、信息等领域扩展，并深刻地影响着各国科技水平的发展程度。激光加工技术在 21 世纪引起了一次新的技术革命。

激光材料加工技术是一门综合性很高的技术，它交叉了光学、材料科学与工程、机械制造学、数控技术及电子等学科，属于当前国内外科技界和产业界共同关注的热点，由于激光固有的四大特性（高的单色性、方向性、相干性和高能量密度），它被广泛应用于工业、农业、国防、医学、科学实验和娱乐诸多方面，并发挥着十分重要的作用。

本书共分 10 章，第 1 章主要介绍激光的基本知识、激光材料加工的特点、国内外发展的状况及趋势；第 2 章主要介绍激光材料加工的技术基础；第 3 章着重介绍激光与材料的交互作用，它是本书的基础理论部分，许多激光材料加工的科学问题都与此相关；第 4 章讲述激光制备耐热耐蚀复合材料涂层及其应用；第 5 章主要介绍激光制备金属基梯度复合材料涂层及其应用；第 6 章着重讲述激光制备梯度生物医学陶瓷材料及其应用；第 7 章主要介绍激光熔覆制备形状记忆合金涂层及应用；第 8 章主要介绍激光制备纳米材料及其应用；第 9 章介绍激光制备电子功能陶瓷及其应用；第 10 章主要介绍激光制备高熵合金涂层及其应用。

作者长期从事激光材料加工技术的教学、科研以及产业化推广应

用工作，书中许多内容是作者科研成果的真实反映。本书目的在于向广大读者介绍激光制备先进材料的相关技术及其应用领域，力争做到条理清楚，概念准确，通俗易懂。

本书在编写过程中始终得到贵州大学党政领导的关心和支持，在此作者致以深深的谢意。感谢我的研究生周芳、李宝增为第4章和第5章做的大量实验、资料整理及编辑工作；感谢我的研究生朱益志、姚利兰、郑敏和李文飞为第6章做的大量实验和图片整理工作；我的同事徐鹏副教授撰写了第7章并对全书做了校订工作，我深表谢意；我还要感谢我的研究生曲微、郑波和安旭龙为第9章和第10章做的大量试验和理论研究工作的。

由于激光制备先进材料是一种迅速崛起的新材料先进制备手段，诸多理论和工艺尚处在发展阶段。同时由于作者交叉学科的知识有限，书中难免会出现不妥之处，敬请广大读者批评指正。

作 者
2016年1月

目 录

1 绪论	1
1.1 激光产生的基本原理及其发展历程	1
1.1.1 激光产生的基本原理	1
1.1.2 激光的发展历史	2
1.2 激光的特性	3
1.2.1 激光的高亮度	3
1.2.2 激光的高方向性	3
1.2.3 激光的高单色性	3
1.2.4 激光的高相干性	4
1.3 激光材料加工的特点	4
1.4 激光材料加工的发展及应用现状	4
1.4.1 国外激光材料加工的发展及应用	4
1.4.2 我国激光材料加工的发展及应用	5
1.5 激光材料加工的发展趋势	6
2 激光材料加工的技术基础	7
2.1 激光加工用激光器	7
2.1.1 高功率 CO ₂ 激光器系统	7
2.1.2 固体激光器系统	8
2.1.3 准分子激光器系统	9
2.1.4 光纤激光器	10
2.1.5 激光材料加工用其他激光器	11
2.1.6 正确选用材料加工用激光器	11
2.2 激光材料加工成套设备系统	12
2.2.1 激光加工机床	12
2.2.2 激光加工成套设备系统及国内外主要厂家	12
2.3 激光材料加工用光学系统	13
2.3.1 激光器窗口	13

2.3.2	导光聚焦系统及光学元部件 (激光加工外围设备)	14
2.4	激光束参量测量	14
2.4.1	激光束功率、能量参数测量	14
2.4.2	激光束模式测量	14
2.4.3	激光束束宽、束散角及传播因子测量	16
2.4.4	激光束偏振态测量	17
2.4.5	激光束的光束质量及质量因子 M^2 的概念	18
3	激光与材料交互作用的理论基础	19
3.1	材料对激光吸收的一般规律	19
3.1.1	吸收系数与穿透深度	19
3.1.2	激光垂直入射时的反射率和吸收率	20
3.1.3	吸收率与激光束的偏振和入射角的依赖关系	20
3.2	激光束与金属材料的交互作用	21
3.2.1	交互作用的物理过程	21
3.2.2	固态交互过程	23
3.2.3	液态交互作用	24
3.2.4	气态的交互作用	24
3.2.5	激光诱导等离子体现象	24
3.3	激光束作用下的传热与传质	25
3.3.1	传热过程	25
3.3.2	传质过程	32
3.4	高能束加热的固态相变	33
3.4.1	固态相变硬化特征	33
3.4.2	固态相变组织	37
3.5	高能束加热的熔体及凝固	40
3.5.1	熔体特性	40
3.5.2	凝固特征	42
3.5.3	凝固组织	45
3.5.4	重熔凝固组织	45
3.5.5	自由表面组织	46
4	激光制备耐热耐蚀复合材料涂层及其应用	47
4.1	激光技术制备耐热与耐腐蚀复合材料的理论基础	47

4.1.1	激光技术制备耐热与耐腐蚀复合材料的联系与区别	47
4.1.2	增强体在激光表面热处理过程中的变化	47
4.1.3	激光技术制备合金化涂层成分均匀化原理	48
4.1.4	激光熔覆与激光合金化的应力状态、裂纹与变形	49
4.1.5	激光熔覆与激光合金化的气孔及其控制	50
4.2	激光制备耐腐蚀复合材料	51
4.2.1	材料腐蚀给国民经济造成了极大的损失	51
4.2.2	激光制备耐腐蚀复合材料方法分类	52
4.2.3	激光技术制备耐腐蚀涂层粉末体系与应用	52
4.3	激光制备耐热复合材料	54
4.3.1	激光制备耐热复合材料分类	54
4.3.2	激光制备耐热复合材料体系与应用	54
5	激光制备金属基复合材料耐磨涂层及其应用	57
5.1	激光熔覆制备金属基梯度复合材料耐磨涂层	57
5.1.1	梯度涂层成分设计	57
5.1.2	梯度涂层的激光熔覆制备过程	58
5.1.3	梯度涂层的组织与性能	58
5.1.4	梯度复合材料涂层的应用	61
5.2	球墨铸铁激光熔凝淬火形成的网络状复合材料	64
5.2.1	球墨铸铁激光熔凝淬火组织	64
5.2.2	球墨铸铁激光熔凝淬火性能	65
5.3	球墨铸铁激光熔凝淬火的应用	68
6	激光制备梯度生物医学陶瓷材料涂层及其应用	69
6.1	激光熔覆制备梯度生物活性陶瓷复合涂层	70
6.1.1	梯度生物活性陶瓷涂层成分设计	70
6.1.2	梯度生物活性陶瓷涂层的制备过程	72
6.1.3	梯度生物活性陶瓷涂层的组织结构	74
6.1.4	梯度生物活性陶瓷涂层的力学性能	80
6.2	梯度生物活性陶瓷涂层的生物活性	97
6.2.1	生物陶瓷涂层的模拟体液试验	97
6.2.2	梯度生物陶瓷涂层的动物实验	105
6.2.3	梯度生物陶瓷涂层的细胞学实验	116

6.2.4 梯度生物陶瓷涂层与蛋白质的相互作用	120
6.3 梯度生物陶瓷涂层的应用	122
7 激光熔覆制备形状记忆合金涂层	123
7.1 激光熔覆 Fe-Mn-Si 记忆合金涂层的制备工艺	124
7.1.1 记忆合金涂层的试验流程	124
7.1.2 记忆合金涂层的粉末配制	125
7.2 记忆合金涂层的工艺优化	126
7.2.1 记忆合金涂层的预置粉末厚度	127
7.2.2 记忆合金涂层的多道搭接率	127
7.2.3 记忆合金涂层的比能量	128
7.3 记忆合金涂层的成分设计	130
7.3.1 激光熔覆过程中各元素的变化规律	130
7.3.2 比能量对记忆合金涂层化学成分的影响	131
7.3.3 记忆合金涂层粉末配方优化	131
7.4 记忆合金涂层的组织结构分析	132
7.4.1 记忆合金涂层的宏观形貌分析	132
7.4.2 记忆合金涂层的显微组织分析	134
7.4.3 记忆合金涂层的相组成分析	135
7.5 记忆合金涂层的力学性能分析	136
7.5.1 记忆合金涂层的形状恢复率	136
7.5.2 记忆合金涂层的耐磨性分析	137
7.5.3 记忆合金涂层的耐蚀性分析	139
7.5.4 记忆合金涂层的接触疲劳性能分析	140
7.6 记忆合金涂层的残余应力分析	141
7.6.1 记忆合金涂层残余应力的定性分析	141
7.6.2 记忆合金涂层残余应力的定量分析	142
8 激光制备纳米材料及其应用	147
8.1 激光技术制备纳米材料的优点	147
8.2 激光技术制备纳米材料的方法	148
8.2.1 激光消融技术	148
8.2.2 激光干涉结晶法	148
8.2.3 激光诱导化学气相沉积法 (LICVD)	148

8.2.4	激光加热蒸发法	149
8.2.5	激光分子束外延技术 (LMBE)	149
8.2.6	激光诱导液相沉积法	149
8.2.7	激光气相合成法	149
8.2.8	利用飞秒激光制备高纯金属纳米颗粒	150
8.2.9	激光聚集原子沉积法	150
8.2.10	激光脉冲沉积法 (PLD)	150
8.3	激光制备纳米材料的机理	150
8.3.1	激光诱导等离子体的原理与机制	150
8.3.2	激光制备纳米粒子生成原理与成核生长机理	151
8.4	激光技术在纳米材料制备中的应用实例	151
8.4.1	激光烧蚀法制备零维、一维、二维纳米材料	151
8.4.2	激光干涉结晶技术制备二维有序分布纳米硅阵列	155
8.4.3	激光诱导化学气相沉积法制备纳米氮化硅及粉体	157
9	激光制备电子功能陶瓷及其应用	160
9.1	电子功能陶瓷概述	160
9.2	钛酸钡电子功能陶瓷研究现状及发展趋势	162
9.2.1	钛酸钡的主要制备方法	162
9.2.2	钛酸钡电子功能陶瓷的组织结构	166
9.2.3	钛酸钡的性能	169
9.2.4	钛酸钡的应用	171
9.3	钛酸钡电子功能陶瓷目前存在的问题	172
9.4	宽带 CO ₂ 激光烧结钛酸钡电子功能陶瓷	173
9.5	宽带激光制备钛酸钡电子功能陶瓷材料及方法	174
9.5.1	试验材料	174
9.5.2	试验方法	175
9.6	激光烧结工艺参数对钛酸钡陶瓷组织性能的影响	178
9.6.1	不同工艺参数下样品的宏观质量	178
9.6.2	物相分析	179
9.6.3	四方相含量分析	181
9.6.4	BaTiO ₃ 陶瓷的组织结构分析	182
9.7	掺杂对钛酸钡陶瓷的影响	185
9.7.1	物相分析	186

9.7.2 结构分析	187
10 激光制备高熵合金涂层及其应用	190
10.1 高熵合金理论基础	190
10.2 高熵合金特性	192
10.2.1 高熵效应	192
10.2.2 晶格畸变效应	193
10.2.3 迟滞扩散效应	194
10.2.4 鸡尾酒效应	195
10.3 高熵合金的制备方法	195
10.3.1 真空电弧熔炼	195
10.3.2 磁控溅射法	196
10.3.3 电化学沉积法	197
10.3.4 其他方法	197
10.4 高熵合金的性能及应用	197
10.5 激光制备高熵合金工艺优化	199
10.5.1 激光熔覆功率对高熵合金涂层组织的影响	201
10.5.2 激光熔覆扫描速度对高熵合金涂层组织的影响	201
10.6 激光制备高熵合金涂层组织结构分析	204
10.6.1 XRD 物相分析	204
10.6.2 SEM 分析	205
10.6.3 金相组织分析	209
10.6.4 激光熔覆高熵合金 $Ti_xFeCoCrWSi$ 涂层的硬度	211
10.6.5 激光熔覆高熵合金 $Ti_xFeCoCrWSi$ 涂层磨损性能	213
10.6.6 激光熔覆高熵合金 $Ti_xFeCoCrWSi$ 涂层电化学腐蚀性能	215
参考文献	218

1 绪 论

1.1 激光产生的基本原理及其发展历程

1.1.1 激光产生的基本原理

激光是受激辐射而产生的增强光。受激辐射与自发辐射有本质的区别。光的受激辐射是指高能级 E_2 的粒子，受到从外部入射的频率为 ν 的光子的诱发，辐射出一个与入射光子一模一样的光子，而跃迁回低能级的过程，如图 1-1 所示。

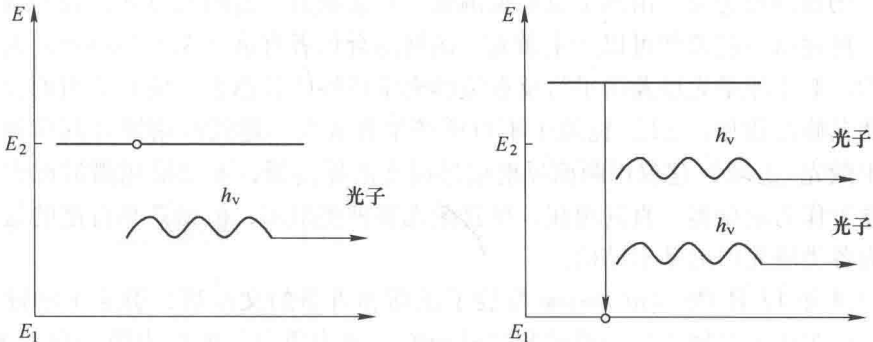


图 1-1 光的受激辐射

受激辐射光有三个特征：

- (1) 受激辐射光与入射光频率相同，即光子能量相同；
- (2) 受激辐射光与入射光相位、偏振和传播方向相同，所以两者是完全相干的；
- (3) 受激辐射光获得了增强。

激光形成的物理过程是产生激光的工作物质受激发造成粒子反转状态，并不断增强至占优势的过程。将受激的工作物质放在两端有反射镜的光学谐振腔中，并提供外界光辐射，如氙灯、氪灯或辉光放电等，则受激辐射将会不断产生激光光子。在此产生的光子中，其运动方向与光腔轴线方向不一致的光子，都从侧面

逸出腔外并转换为热能，没有激光输出。只有运动方向与光腔轴线方向一致的光子，被两面反射镜不断地往返反射，来回振荡，从而得到放大，当这种光放大超过腔内损耗（包括散射、衍射损耗等），即光放大超出腔内的阈值时，则会在激光腔的输出端产生激光辐射——激光束。

由上述激光原理可知，任何类型的激光器都要包括三个基本要素：（1）可以受激发的激光工作物质；（2）工作物质要实现粒子数反转；（3）光学谐振腔。

1.1.2 激光的发展历史

1960年，世界上第一台激光器由美国科学家梅曼（T. H. Maiman）研究成功。1960年7月7日，*New York Times*发表了梅曼研制成第一台激光器的消息，随后又在英国*Nature*和*British Commum*发表，第二年其详细论文在*Physical Review*上刊出。其实，Einstein在1916年便提出了一种现在称之为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，马里兰大学的Weiber（韦伯）开始运用上述概念去放大电磁波，但其工作没有进展，也没有引起广泛的注意，后来激光的发明人汤斯（C. Townes）向韦伯索要了论文，继续这一工作，才打开了一个新的领域。汤斯的设想是：由四个反射镜围成一只玻璃盒，盒内充以铷，盒外放一盏铷灯，使用这一装置便可以产生激光。汤斯的合作者肖洛（A. Schawlow）擅长于光谱学，对于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了两条修改意见：（1）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）；（2）建议用两面反射镜形成光的振荡器，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，但汤斯和肖洛的这一设想仍为各类激光器的基本结构。

1958年12月*Physical Review*发表了汤斯和肖洛的文章后，引起了物理界的关注，许多学者参加了这一理论和实验研究，都力争自己能造出第一台激光器。汤斯和肖洛都没有取得成功，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，一年多后，在世界上出现的第一台激光器正是梅曼用红宝石研制的。尽管世界上第一台红宝石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。

- （1）1962年，出现了半导体激光器；
- （2）1964年，C. Patel（帕特尔）发明了第一台CO₂激光器；
- （3）1965年，发明了第一台YAG激光器；
- （4）1968年，发展高功率CO₂激光器；
- （5）1971年出现了第一台商用1kWCO₂激光器。

上述一切，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。

我国激光研究起步之快，发展之迅速令我们骄傲和自豪。

(1) 1961年9月，王之江领导了第一个固体红宝石激光装置在长春光机所成功运行。

(2) 1963年7月，邓锡铭领导建立的第一台气体激光器（氦管）在光机所成功运行。

其后，在该所相继由王乃弘建立了钾砷半导体激光器；刘颂豪、沃新能用所里生产的晶体建立了氟化钙激光器；干福熹等建立了钽玻璃激光器；刘顺福建立了含铍钨酸钙晶体激光器；吕大元，余文炎建立了转镜Q开关激光器。

1.2 激光的特性

1.2.1 激光的高亮度

$$B = P / (S \cdot \Omega) \quad (\text{W} / (\text{cm}^2 \cdot \text{Sr}))$$

太阳光的亮度值约为 $2 \times 10^3 \text{ W} / (\text{cm}^2 \cdot \text{Sr})$ 。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 (Ω) 都很小，而输出功率 (P) 都很大的缘故。

1.2.2 激光的高方向性

激光的高方向性主要是指其光束的发散角小。光束的立体发散角为：

$$\Omega = \theta_2 \approx (2.44\lambda/D)^2$$

式中， λ 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。对于基模或高斯模，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。

1.2.3 激光的高单色性

单色性用 $\Delta\nu/\nu = \Delta\lambda/\lambda$ 来表征，其中 ν 和 λ 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 K_r^{86} 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 $10^{-10} \sim 10^{-13}$ 量级，要比原有的 K_r^{86} 灯高几万倍至几千万倍。

1.2.4 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 描述垂直光束传播方向平面上各点之间的相位关系；时间相干性 Δt 则描述沿光束传播方向上各点的相位关系。相干性完全由光波场本身的空洞分布（发散角）特性和频率谱分布特性（单色性）决定。由于激光的 θ 和 $\Delta\nu$, $\Delta\lambda$ 都很小，故其 $S_{\text{相干}} = \frac{\lambda}{\theta}$ 和相干长度 $L_{\text{相干}} = C \cdot \Delta t_{\text{相干}} = \frac{C}{\Delta\nu}$ 都很大。

正是由于激光具有如上所述 4 大特点，才使其得到了广泛的应用。激光在材料加工中的应用就是其应用的一个重要领域。

1.3 激光材料加工的特点

由于激光具有 4 大特点，因此，就给激光加工带来了如下传统加工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) 激光加工的工件热影响区小，工件热变形小，后续加工量小。

(5) 激光可通过透明介质对密闭容器内的工件进行各种加工。

(6) 激光束易于导向。聚焦可实现各方向变换，极易与数控系统配合，对于复杂工件进行加工，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显著。

1.4 激光材料加工的发展及应用现状

1.4.1 国外激光材料加工的发展及应用

迄今为止，全球已形成了以美国、欧盟、日本等国家为领头羊的激光加工市场，激光材料加工正以前所未有的速度成为 21 世纪先进加工及制造技术，并已

经在全球形成了一个新兴的高技术产业。

(1) 激光器市场的发展。目前, 激光加工所用设备主要为 CO_2 激光器和 Nd: YAG 激光器 (掺钕钇铝石榴石激光器), 针对不同的材料加工, 现已开发出多种激光器应用于工业加工, 如半导体激光器、准分子激光器、光纤激光器等。

(2) 激光加工工艺的发展。激光加工工艺从最早的激光淬火到激光合金化, 激光熔覆再到当前的激光加工组合工艺, 已形成一套完整的工艺制度。

(3) 激光加工应用市场。目前, 激光加工已广泛应用于航空航天、机械、冶金、造船等行业。随着激光加工技术的不断推广应用, 它必定会进一步向其他领域迈进。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 1000 家, 其规模大小不等, 有的只承担单一工种的加工, 有的则可以承担各种要求的加工。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。

1.4.2 我国激光材料加工的发展及应用

我国第一台激光器从 1961 年便研制成功, 1963 年研制成功激光打孔机, 1965 年正式在拉丝和手表宝石轴承上采用激光打孔。以后相继采用 CO_2 激光器, 钎玻璃激光器, YAG 激光器可针对不同材料、不同零件进行打孔。

我国自改革开放以来, 通过“六五”、“七五”、“八五”三个五年计划的攻关, 高功率激光器的研制水平日臻成熟。在激光热处理、激光焊接、激光打孔、激光切割等方面已取得了巨大的经济效益和社会效益。从 1997 年至 2005 年, 激光加工年产值以 42% 的速度递增, 全国大约已建立了 1000 多家 Job Shop。

(1) 在激光器的研制方面。我国现在已能自己生产从低功率到高功率的 CO_2 激光器、YAG 激光器。但半导体激光器、光纤激光器、准分子激光器尚处于研制中, 主要从国外进口这些设备进行产业化。

(2) 激光工艺研究和开发方面。激光淬火工艺已经成熟应用。

激光熔覆工艺有的已经成熟应用于生产, 有的则处于研究之中, 其中关键技术是熔覆材料的研发, 激光切割和焊接的复合工艺已在积极的研究之中。

(3) 激光加工应用市场。

1) 在汽车行业, 主要是激光淬火汽车的发动机曲轴、凸轮轴、缸体、缸套等。

2) 在冶金行业, 主要是大型轧辊的激光熔覆和激光合金化。

3) 在机械行业, 主要是报废贵重模具的激光熔覆修复以及各种零部件的激光切割。

4) 在电子行业, 主要是手机电池和集成电路激光焊接。

1.5 激光材料加工的发展趋势

目前,激光材料加工的发展趋势主要体现在以下几个方面:

(1) 材料方面。针对激光熔覆修复工件的材料种类,分别研制出不同基体材料的激光熔覆修复专用材料。例如目前已研制出中碳、低碳钢激光熔覆修复专用材料,用于铸铁类零件激光修复的专用材料也正在研制之中。

(2) 工艺控制方面。对于激光熔覆工艺而言,其发展趋势是开发一套基于激光熔覆的在线监控系统,对激光熔覆过程进行实时监控。研制与激光熔覆相配套的复合工艺使熔覆过程中避免工件的开裂倾向。

(3) 加工过程的智能化与机器人化。为了提高激光材料加工的工作效率,智能化机器人已逐步得到应用。

(4) 结合激光加工技术的 3D 打印正在全球迅速发展。