

# 激光表面改性技术 及其应用

■ 姚建华 编著

LASER SURFACE MODIFICATION TECHNOLOGY  
AND APPLICATION



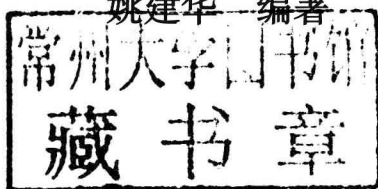
国防工业出版社

National Defense Industry Press

# 激光表面改性技术 及其应用

---

姚建华 编著



国防工业出版社  
<http://www.ndip.cn>

## 内 容 简 介

本书总结提炼作者几十年的激光表面改性研究成果。全书共 13 章,分别系统介绍了激光表面改性基础理论、专用成套设备、激光相变硬化、激光重熔强化、激光合金强化、激光熔覆、纳米结构表面改性、激光与化学复合镀制备纳米结构表面改性、激光化学反应原位合成 TiC 涂层、激光冲击硬化、激光非晶化表面改性、有色金属激光表面改性以及激光安全操作与防护。

本书可供从事机械工程、激光技术、国防军事和装备制造等领域的科技工作者研究参考,可作为高等院校学生教学参考书,也可供机械工程、光学工程、装备制造领域的技术人员、大专院校师生以及与其有关的技术工人阅读和参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

激光表面改性技术及其应用 / 姚建华编著. —北京:  
国防工业出版社, 2012. 1  
ISBN 978 - 7 - 118 - 07801 - 5

I. ①激… II. ①姚… III. ①激光应用 - 金属表面  
处理 IV. ①TG178

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 001464 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  
新华书店经售

开本 710 × 960 1/16 印张 16½ 字数 287 千字  
2012 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 42.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777  
发行传真:(010)88540755

发行邮购:(010)88540776  
发行业务:(010)88540717

激光表面改性技术是一种先进的表面工程技术,随着我国制造业快速发展,该技术的应用越来越广泛,为我国装备制造业关键部件的性能提升发挥着越来越重要的作用。

姚建华教授多年一直专注于激光表面改性技术的研究与实践,并取得了显著的成效。该书主体内容来自作者多年的教学科研和工程实践,汇聚了作者多年研究结果、图片和实例,对作者多年来在激光表面改性领域获得的成果进行了系统梳理和提炼,尤其是在激光与纳米复合涂层技术等其他表面改性技术复合的工艺理论与应用方面,具有较大的突破。

该书内容具有重要学术价值和实践参考价值,进一步丰富了我国的表面工程理论和应用技术,不仅对我国工业制造领域应用具有实际参考价值,而且,许多技术成果也可以在我国国防装备上应用,对提升国防装备关键部件性能有着重要的现实意义。

徐滨士

装甲兵工程学院教授、中国工程院院士

我国有数万亿元的装备在服役之中,每年因其关键零部件腐蚀、磨损、使设备停产、报废造成的损失占国民经济总产值的3%~5%。激光表面改性技术在工业生产中易损易耗零部件的强化与制造方面发挥了重要作用。我国经过了几个五年国家科技攻关计划,使该技术已在多个领域得到了应用。尤其近十几年来,随着我国制造业的崛起和发展,激光表面改性技术的市场越来越广泛,技术成熟程度和成果显然比十几年前有着突飞猛进的进步,被公认为是表面工程中的先进技术之一,也是未来工业应用潜力最大的先进技术之一。因此,有必要予以总结,以便指导推广应用。

本书是我20多年来从事激光表面改性理论研究和实践应用工作成果的总结与提炼。从1987年开始进入该领域的学习和研究,值得庆幸的是一直未有间断,本书内容汇聚了我和我的团队长期的理论与实践经验,大部分参考文献来自我的研究论文或指导的学位论文。本书重视理论与实践应用的结合,首先在自身研究基础上,引用了国内外该领域成熟的基本理论和观点;其次,结合自身的实践,重点阐述了该领域内有着广阔发展前景、广泛应用价值以及国防工业现代化所需的新材料、新工艺及新技术,如纳米结构表面改性技术和激光复合表面改性技术等,书中所列的应用实例均是已经或正在投入批量生产的工业产品或服役中的机械装备;然后再将实践经验升华到理论以利于进一步指导实践。力争在上述几个方面形成自身的特点。

本书主要内容包含三个部分。第一,简述了激光的特性、激光表面改性的内涵及其在发展循环经济、建设节约型社会中的作用以及激光表面改性技术的国内外发展现状与展望;第二,系统阐述了激光表面改性多个关键技术、工艺及应用案例;第三,介绍了激光表面改性成套设备的类型、特性和选择原则,便于用户选用。目的是为有志进入本领域开拓的科研工作者、教师、学生和广大技术人员提供参考。

作为科研探索,激光熔覆层缺陷是制约激光表面改性技术进一步推广应用的瓶颈和研究难点,本书对激光熔覆层缺陷抑制方法和专用材料研究的前沿课题,作了较全面的总结,提出了若干技术难点,以望能给广大科研工作者参考的同时,尽快予以突破。

本书的撰写得到了我的导师苏宝蓉研究员的悉心指点,她为此书倾注了大量的精力和时间,她作为我国激光加工表面改性技术研究的开创者之一,身体力行,不仅对激光表面改性技术研究与应用投入了自己毕生的精力,为我国激光加工技术发展做出了重要贡献;而且,她孜孜不倦的学术追求和严谨求实的治学风格,已成为我们这一代德高望重的楷模,本书内容是在她研究基础上进一步扩展的结果。另外,本书成果也是我的团队成员共同努力的结晶,感谢楼程华、张群莉、胡晓冬、孔凡志、陈智君等教师及我的学生们对本书做出的贡献。为了系统完整性,本书也引用了国内外同行专家发表论文或专著的部分内容,在此一并表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,时间仓促,书中难免有欠缺和不足,恳请广大读者予以批评指正。

编者  
2011. 10

---

<b>第 1 章 概述</b>	<b>1</b>
1.1 激光表面改性技术基础	1
1.1.1 激光产生机理	1
1.1.2 激光的特性与模式	4
1.1.3 激光与材料相互作用的物理基础	7
1.1.4 金属材料对激光的吸收	12
1.2 激光表面改性主要技术内容与特点	21
1.2.1 激光表面改性技术内容	21
1.2.2 激光表面改性技术特点	23
1.3 激光表面改性技术的内涵及作用	24
1.3.1 激光表面改性技术的内涵	24
1.3.2 激光表面改性技术在发展循环经济、建设节约型社会中的作用	25
1.4 激光表面改性技术国内外发展现状与展望	25
1.4.1 激光表面改性技术国外发展现状	25
1.4.2 激光表面改性技术国内发展现状	27

1.4.3 激光表面改性技术存在的问题与前景展望	29
参考文献	30

---

## **第2章 激光表面改性成套设备** 32

---

2.1 激光器的类型、特点与选用原则	32
2.1.1 气体激光器	32
2.1.2 掺钕钇铝石榴石(Nd:YAG)激光器	34
2.1.3 准分子激光器	35
2.1.4 半导体激光器	36
2.1.5 光纤激光器	37
2.1.6 激光器选用原则	38
2.2 导光聚焦系统	39
2.2.1 激光传输与变换设计	40
2.2.2 光束聚焦系统	41
2.3 喂料系统	44
2.3.1 自动送粉系统	45
2.3.2 自动送丝系统	53
2.4 激光表面改性质量监控系统	55
2.4.1 温度检测与反馈控制系统	55
2.4.2 激光表面改性成套设备在线质量控制与集成	55
参考文献	58

---

## **第3章 激光相变硬化表面改性技术与应用** 60

---

3.1 激光相变硬化表面改性工艺及特性	60
3.1.1 激光相变硬化表面改性工艺	60
3.1.2 激光相变硬化表面改性技术特性	65



3.2	激光相变硬化机理	66
3.3	激光表面固溶强化	66
3.3.1	激光固溶强化机理	66
3.3.2	激光表面固溶强化工艺及特性	68
3.4	激光相变硬化的计算机模拟	69
3.4.1	激光相变硬化的计算机模拟	69
3.4.2	人工神经网络在激光相变硬化中的应用	69
3.5	激光相变硬化专家系统	70
3.5.1	专家系统基本结构	70
3.5.2	专家系统正向推理的设计与使用实例	70
3.5.3	专家系统逆向推理的设计与使用实例	71
3.5.4	专家系统的集成	73
3.6	激光相变硬化工业应用	74
3.6.1	可进行激光相变硬化的工件分类	74
3.6.2	激光相变硬化工业应用实例	75
	参考文献	85

---

## **第4章 激光重熔强化表面改性技术与应用** 87

---

4.1	激光表面重熔强化工艺及特性	87
4.1.1	激光重熔强化工艺	87
4.1.2	激光重熔强化表面改性技术特性	88
4.2	激光表面重熔强化机理	89
4.2.1	温度梯度对界面稳定性的影响	89
4.2.2	浓度梯度对界面稳定性的影响	89
4.2.3	界面能对界面稳定性的影响	90
4.2.4	界面稳定性与晶体生长形态的关系	90
4.3	激光重熔强化表面改性工业应用	91

4.3.1	冶金工业冷轧辊激光毛化表面改性的应用	91
4.3.2	冶金工业热轧辊激光重熔强化表面改性的应用	94
4.3.3	65Mn 钢金刚石锯片基体激光表面重熔强化的应用	95
	参考文献	96

---

## **第 5 章 激光合金强化表面改性技术与应用** 98

---

5.1	激光合金化工艺与特性	98
5.1.1	激光合金化工艺	98
5.1.2	激光合金化特性	99
5.2	激光合金化机理	99
5.3	激光合金化合金成分的设计	100
5.4	激光合金强化表面改性技术应用实例	102
5.4.1	不锈钢刀具刃口激光合金化技术的应用	102
5.4.2	汽轮机叶片激光合金化表面改性技术的应用	103
5.4.3	螺杆激光表面合金化技术的应用	106
5.4.4	塑料刀片激光合金化替代焊接	109
	参考文献	111

---

## **第 6 章 激光熔覆表面改性技术与应用** 112

---

6.1	激光表面熔覆工艺及特性	112
6.1.1	激光熔覆工艺技术	112
6.1.2	激光熔覆特性	113
6.2	激光熔覆表面改性技术的机理	114
6.3	激光熔覆表面改性的专用材料	114
6.3.1	激光熔覆专用合金粉	114

6.3.2	激光熔覆专用药芯合金丝	121
6.4	激光熔覆工艺参数对熔覆层形状及稀释率的影响	126
6.4.1	对熔覆层形状的影响	126
6.4.2	激光工艺参数对稀释率的影响	128
6.5	激光熔覆层裂纹、气孔的产生与控制	130
6.5.1	激光熔覆层应力状态	130
6.5.2	激光熔覆层裂纹的产生与控制	134
6.5.3	激光熔覆层气孔的产生与控制	139
6.6	激光熔覆表面改性工业应用实例	140
6.6.1	激光三维熔覆大型超临界汽轮机叶片替代传统的 镶嵌工艺	140
6.6.2	激光三维熔覆注塑(橡)机螺杆替代进口 双金属螺杆	142
6.6.3	激光熔覆技术在石化系统的碱过滤器中的应用	146
6.6.4	用专用药芯合金丝激光熔覆大型汽车模具及 卧螺离心机叶片	149
	参考文献	152

---

## 第7章 激光熔覆法制备纳米结构表面改性涂层技术与应用 153

---

7.1	纳米结构涂层概述	153
7.1.1	纳米结构涂层制备方法	154
7.1.2	激光纳米涂层的特性	154
7.2	激光熔覆制备纳米结构涂层的工艺技术	155
7.2.1	纳米材料的预置工艺技术	155
7.2.2	激光熔覆纳米涂层的工艺技术	156
7.3	预置法制备纳米 $Al_2O_3/Ni/CNT$ 复合涂层	157

7.3.1	制备方法	157
7.3.2	纳米 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 含量对组织、性能的影响	158
7.3.3	工艺参数对涂层组织、性能的影响	160
7.3.4	纳米材料的复合对涂层组织、性能的影响	161
7.3.5	形成机理分析	163
7.4	预置法制备纳米碳化钨涂层	164
7.4.1	制备方法	164
7.4.2	激光扫描后的组织转变及分析	165
7.4.3	表层性能分析	168
7.4.4	强化机理分析	170
7.5	纳米碳管涂层的组织与性能	171
7.5.1	表面碳化层组织结构及其转变机理	172
7.5.2	表面碳化层的硬度分析	175
7.5.3	磨损性能	176
7.6	激光制备纳米结构涂层工业应用实例	177
	参考文献	179

---

## **第 8 章 激光与化学复合镀制备纳米结构表面改性涂层技术与应用** 180

---

8.1	激光与化学镀复合制备纳米结构涂层工艺与设备	180
8.1.1	激光与化学镀复合的晶态转变纳米结构涂层	180
8.1.2	激光与化学镀复合制备金属间化合物的 纳米结构涂层	181
8.2	激光与化学镀复合纳米涂层的组织形貌	182
8.2.1	镀层的组织形貌	182
8.2.2	激光熔覆后复合镀层的微观组织形貌 及其形成原因	184

8.3 激光与化学复合镀复合涂层的性能	190
8.4 纳米 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 镀层复合强化机理	193
参考文献	195

---

## **第 9 章 激光化学反应原位合成 TiC 涂层的工艺技术** 197

---

9.1 激光化学反应原位合成 TiC 涂层的制备工艺与设备	197
9.1.1 反应粉体的制备工艺与设备	197
9.1.2 预置层的激光强化处理工艺与设备	199
9.2 激光化学反应合成 TiC 涂层组织形貌与形成机理	199
9.2.1 微观组织分析	199
9.2.2 碳化钛原位合成机理分析	202
9.3 激光化学反应合成 TiC 涂层的性能	204
9.4 激光制备 TiC 复合涂层的其他方法	206
9.4.1 直接加入 TiC 颗粒法	206
9.4.2 激光辅助自蔓延合成法	206
9.4.3 预置 C 源原位合成法	206
9.4.4 激光辅助铝热还原法	207
9.5 原位化学合成的扩展反应	207
参考文献	207

---

## **第 10 章 激光冲击硬化表面改性技术与应用** 209

---

10.1 激光冲击硬化工艺及特性	209
10.1.1 激光冲击硬化工艺	209
10.1.2 激光冲击硬化特性	210
10.2 激光冲击硬化的机理	212

10.3 激光冲击硬化的工业应用	213
参考文献	215
<hr/>	
<b>第 11 章 激光非晶化表面改性技术与应用</b>	<b>216</b>
<hr/>	
11.1 激光非晶化工艺及特性	216
11.1.1 激光制备非晶层的工艺方法	217
11.1.2 激光非晶化特性	219
11.2 激光非晶化机理	220
11.3 激光非晶化工业应用实例	221
参考文献	222
<hr/>	
<b>第 12 章 有色金属激光表面改性技术与应用</b>	<b>223</b>
<hr/>	
12.1 铝合金激光表面改性技术	223
12.1.1 铝合金特性	223
12.1.2 铝合金激光重熔强化改性技术	224
12.1.3 铝合金激光合金化表面改性技术	224
12.1.4 铝合金激光熔覆表面改性技术	225
12.1.5 铝合金激光表面改性技术的工业应用	226
12.2 镁合金激光表面改性技术	228
12.2.1 镁合金激光表面重熔改性技术	228
12.2.2 镁合金激光表面合金化改性技术	229
12.2.3 镁合金激光表面熔覆改性技术	229
12.3 钛合金激光表面改性技术	230
12.3.1 钛合金激光表面熔凝技术	230
12.3.2 钛合金激光表面合金化技术	231

12.3.3 钛合金激光表面熔覆技术	233
12.4 铜及铜合金激光表面改性技术	237
参考文献	238
<b>第 13 章 激光安全操作与防护</b>	<b>241</b>
13.1 激光表面改性过程对人体的潜在危害	241
13.1.1 对眼睛的危害	242
13.1.2 对皮肤的危害	243
13.1.3 电气对人体的危害	243
13.1.4 有毒气体及粉尘的危害	243
13.2 安全防护措施	244
13.2.1 激光表面改性处理系统危害的工程控制	244
13.2.2 个人防护	246
13.3 激光安全管理	246
参考文献	247

---

# 1

---

## 概 述

---

### 1.1 激光表面改性技术基础

#### 1.1.1 激光产生机理

##### 1. 原子的能级和跃迁

原子是由带正电的原子核和核外一定数目的运动电子所组成的。电子可以在核外不同的分离轨道上绕原子核运动,这些在各个轨道上运动的电子与原子核共同确定了原子的能量(电子的动能和电子与核间的位能)。电子分布于离核最近的一些轨道时,原子的总能量最低,称原子处于基态;由于外界作用使电子重新分布于离核较远的外层轨道时,原子的总能量较高,称原子处于激发态(图 1-1)。各种不同的能量状态称为能级,原子可能具有的总能量值不是连续分布的,而是一系列分立的数值,故其能级的分布也是分立的。

电子在核外的分布不是一成不变的,当原子受到外界能量作用时,电子的分布就会发生变化,原子的能量也随之变化。原子从一种能量状态变化到另一种能量状态的过程叫做跃迁。原子跃迁时的能量变化 $\Delta E$ 以光波的形式发射或



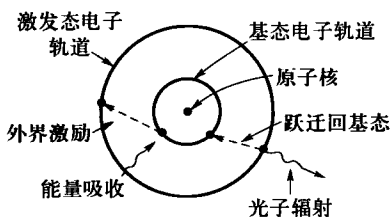


图 1-1 原子的结构和能量变化

吸收。

$$\Delta E = h\nu = hc/\lambda \quad (1-1)$$

式中： $c$  为光速； $\lambda$  为波长； $\nu$  为频率； $h$  为普朗克常数， $h = 6.62 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ 。

原子的能级图表示原子所具有的各种能量状态和可能的跃迁变化(图 1-2)。同理,离子、分子等粒子也都有各自的能级图。

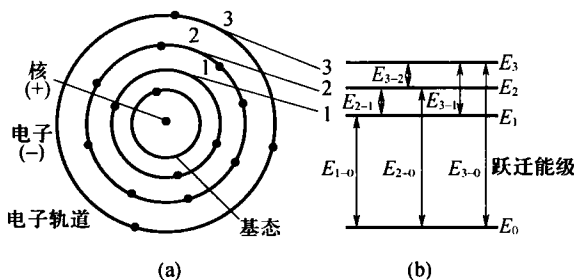


图 1-2 电子轨道与能级图

(a) 核和电子轨道；(b) 能级图。

## 2. 自发辐射

原子总是趋向于回复到能量最小的基态,基态是一种稳定状态。处于激发态的粒子能量大,是很不稳定的,它可以不依赖于任何外界因素而自动地从高能级跳回低能级,并辐射出频率为  $\nu$  的光波:

$$\nu = (E_2 - E_1)/h \quad (1-2)$$

式中： $E_2$  为高能级能量； $E_1$  为低能级能量。

这一过程称为自发辐射(图 1-3(a))。

自发辐射是普通光源的发光机理。由大量粒子组成的体系,其中各粒子的自发辐射是相互独立的,因而整个体系的自发辐射光的波长和相位是无规则分布的,其传播方向和偏振方向是随机的,自发辐射光是一种非相干光。

## 3. 受激吸收

处于低能级  $E_1$  的粒子,在频率为  $\nu$  的入射光( $\nu$  满足式(1-2))诱发下,吸