

江苏大学专著出版基金资助出版

激光冲击改性与 延寿技术

任旭东 张永康 等编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



江苏大学专著出版基金资助出版

激光冲击改性与延寿技术

**Laser Shock Modification & Life
extension Technology**

任旭东 张永康 等编著



机械工业出版社

本书较为系统地阐述了激光冲击改性及延寿的基本原理,介绍了激光冲击改性涂层技术、激光加工参数选择的方法,对激光冲击改性及延寿进行了模拟与计算,总结了激光冲击改性及延寿技术的发展和科研成果,并通过铝合金、耐热钢的激光表面改性及延寿技术的成功应用实例,充分反映了激光冲击改性及延寿技术的先进性和实用性。本书还介绍了激光冲击改性及延寿技术的国内外发展趋势。

本书读者对象为从事激光加工和表面工程的科技人员、工程技术人员及高等院校相关专业的师生。

图书在版编目(CIP)数据

激光冲击改性及延寿技术/任旭东等编著. —北京:机械工业出版社, 2010.12

江苏大学专著出版基金资助出版

ISBN 978-7-111-32347-1

I. ①激… II. ①任… III. ①激光技术—应用—涂层技术 IV. ①TB43②TN2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 208795 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:季顺利 责任编辑:季顺利 版式设计:霍永明

责任校对:刘志文 封面设计:姚毅 责任印制:李妍

北京外文印刷厂印刷

2011 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·17 印张·326 千字

0001—3000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-32347-1

定价:34.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

策划编辑:(010) 88379082

社服务中心:(010) 88361066 网络服务

销售一部:(010) 68326294 门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649 教材网:<http://www.cmpedu.com>

读者服务部:(010) 68993821 封面无防伪标均为盗版

序

激光加工是激光问世五十年来开发较早、成效卓著的重要应用之一。它利用激光束与物质相互作用的特有效应,对材料(包括金属与非金属)进行去除、连接和表面处理。技术上涉及激光、光学、机械学、电学、材料学、计算机技术等多门学科的交叉和综合。随着激光技术,特别是高功率激光技术的迅猛发展,激光加工技术在工业生产中解决了许多常规方法无法解决或者很难解决的问题,大大提高了工作效率和加工质量,在现代制造业中发挥了越来越大的作用。

在激光加工技术的各种应用中,表面改性与延寿强化占有重要的地位,具有显著的经济效益。据统计,由于机件、构件的磨损、断裂和疲劳破坏,每年造成的经济损失占美、日、欧盟等国国民生产总值的6%~8%。延长各种类型产品的服务寿命,提高零部件工作的安全性、可靠性,已成为现代制造业迫切需要解决的关键科学技术问题之一。本书主要作者及其研究团队,长期从事这一领域的研究与开发,是我国激光冲击加工技术的开创者之一,在激光冲击表面改性与延寿、激光冲击强化等方面,研究成绩卓著,实践经验丰富。以此为基础,吸收综合了国内外激光加工技术的最新进展,经多年努力完成此书。

本书系统阐述了激光冲击表面改性与延寿强化技术的基本理论、先进工艺及成功应用事例。学术体系严谨完整,取材内容翔实新颖,应用实例具体丰富,兼有学术研究专著和技术参考书的特点,具有较好的可读性和借鉴性,值得推荐给广大读者学习参考。

花滇元

中国科学院上海光机所

2010年11月18日

前 言

本书是关于激光冲击加工中表面改性及延寿技术的专著，总结了激光冲击加工表面改性及延寿技术发展和应用的成果，较为系统地描述了激光冲击改性的基本原理、激光冲击改性中涂层与吸收层技术及冲击改性参数的选择，并介绍了铝合金和钢铁冶金产品中耐热钢成功应用的实例，充分反映了这项新技术的先进性和实用性。

激光冲击改性及延寿技术是利用方向、能量高度集中的激光束作为工具，对材料进行表面改性或延寿，是近十几年来迅速发展的材料表面新技术，也是材料科学的最新领域之一。激光冲击改性及延寿技术将现代物理学、化学、计算机、材料科学、先进制造技术等多方面的成果和知识进行综合运用，利用激光表面改性技术能使低等级材料实现高性能表层改性，达到零件低成本与工件表面性能的最佳结合，为解决整体强化和其他表面强化手段难以解决的矛盾带来了解决的可能性，对重要构件材质与性能的选择匹配、设计、制造产生重要的影响，甚至将导致设计和制造工艺的某些根本性变革。本书内容新颖，通过大量的理论和实验研究图表，系统阐述了国内外的激光表面改性及强化工程制造技术的基础理论、应用及最新技术，特别阐述了一些钢铁冶炼技术应用的新进展。

全书共分九章，第1章简洁而全面地介绍了激光冲击改性及延寿技术的基础知识；第2章介绍了激光表面冲击改性及延寿技术，重点介绍了国内外的现状及发展趋势；从第3章到第6章，介绍了激光冲击改性表面涂层技术、激光冲击改性表面吸收层技术、激光延寿机理与参数选择及激光延寿模拟与计算等内容；第7章及第8章分别介绍了铝合金激光冲击延寿、钢铁冶金产品中耐热钢的激光冲击延寿应用现状及成果。第9章简要介绍了其他激光改性延寿技术的应用。

本书的写作过程中，作者几易其稿，尽最大可能采用最好的论证和最通俗的语言来解释较深的激光延寿理论。本书包括了作者所有的经验和实践，兼有学术研究专著和技术参考书的特点，可供从事激光加工的技术人员、实验工作者和研究人員，包括高等院校有关专业的学生、研究生和教师学习参考。

在本书的写作过程中，作者曾多次得益于与多位学者、同仁和朋友的交流。本书由任旭东、张永康、叶云霞、周建忠、葛涛、张朝阳、姜银方、鲁金忠、冯爱新共同编著，张永康教授进行了全书的审核和定稿。在编写过程中，参阅了一些国内外同行的专著、学术论文、学位论文、研究报告及网络信息等，在此向这些研究成果的始作者和发布者表示感谢。研究生皇甫喆卓、姜大伟、张田、赵

倩、李鹏、阮亮等人参与书中部分图的绘制与校对，在此表示感谢。

由于激光冲击改性与延寿制造技术提出的时间不长，还未形成系统完整的理论体系，限于作者水平和学识，书中难免存在不当和错误，敬请广大读者批评指正。

作 者

2010 年 8 月

目 录

序

前言

第1章 表面改性技术 1

1.1 表面改性技术分类 1

1.2 表面改性技术的发展和应 用 2

1.2.1 表面改性技术的发展 2

1.2.2 表面改性技术的应用 4

1.3 激光表面改性技术 5

1.3.1 激光表面改性技术概述 5

1.3.2 激光表面改性技术分类 8

1.4 利用力效应的激光表面改性技术 9

1.5 利用热效应的激光表面改性技术 13

1.5.1 激光掺杂 13

1.5.2 激光退火 16

1.5.3 激光淬火 17

1.5.4 激光珩磨 19

1.6 激光表面改性相关概念介绍 20

1.6.1 物理化学知识 20

1.6.2 激光倍频技术 25

1.6.3 物质与激光作用 28

参考文献 32

第2章 激光冲击改性延寿概论 35

2.1 引言 35

2.2 裂纹面激光冲击改性工艺 36

2.2.1 激光冲击改性技术原理 36

2.2.2 激光冲击改性技术特点 37

2.3 国内外现状与趋势 38

2.3.1 研究现状 38

2.3.2 激光冲击改性发展趋势 41

参考文献 42

第3章 激光冲击改性涂层技术 46

3.1 涂层的吸收机理 46

3.1.1 激光辐照效应 46

3.1.2 材料对激光的吸收 46

3.1.3 激光对材料的加热 52

3.1.4 激光冲击改性冲击波的形成 54

3.2 能量吸收涂层的选择 58

3.2.1 涂层的选择 58

3.2.2 表面涂层与改性效果 60

3.2.3 激光吸收层的解决途径 62

3.3 新型吸收涂层的设计 68

3.4 新型喷涂设备的设计 71

参考文献 74

第4章 涂层约束层的冲击改性优化 76

4.1 涂层成分选择 76

4.2 涂层厚度选择 81

4.2.1 涂层厚度的优选 81

4.2.2 涂层厚度的影响因素 83

4.2.3 涂层厚度与改性效果 85

4.3 涂层均匀度的影响 86

4.4 其他材料涂层的影响 88

4.5 约束层选择 89

4.5.1 约束层成分的选择 89

4.5.2 约束层厚度的选择 94

4.6 复合层参数优化 96

参考文献 100

第5章 激光冲击改性延寿力学机理 104

5.1 引言 104

5.2 改性延寿参数选择 104

5.2.1 激光冲击改性设备选择 104

5.2.2 激光参数选择 105

5.2.3 激光冲击改性装置设计 106

5.3 参数对裂纹面改性延寿效果	108	参考文献	190
5.3.1 功率对改性效果的影响	108	第8章 耐热钢激光冲击改性	
5.3.2 脉宽对改性效果的影响	110	延寿	193
5.3.3 约束层涂层的影响	111	8.1 引言	193
参考文献	115	8.2 常温激光冲击改性	194
第6章 激光冲击改性延寿模拟		8.2.1 激光冲击改性准备	194
与计算	117	8.2.2 疲劳极限计算	195
6.1 激光冲击改性延寿模拟软件	117	8.2.3 改性延寿结果和分析	197
6.2 应力强度因子数值模拟	124	8.3 中高温复合延寿	198
6.2.1 分析模型	125	8.3.1 渗铝改性处理	198
6.2.2 裂纹萌生及扩展	130	8.3.2 渗铝高温改性效果	201
6.3 激光冲击改性二维应力强度		8.3.3 复合延寿疲劳性能效果	208
因子计算	133	8.4 高温激光冲击改性延寿	211
6.3.1 改性区应力强度因子	134	8.4.1 高温裂纹扩展试验	212
6.3.2 有效应力强度因子	137	8.4.2 温度对疲劳性能影响	213
6.3.3 计算结果与模拟实例	140	8.5 激光冲击改性区残余应力	
6.4 激光冲击改性三维应力强度		分析	220
因子计算	144	8.5.1 残余应力对裂纹扩展	
6.4.1 三维应力强度因子模型	146	影响	222
6.4.2 三维应力强度因子求解	146	8.5.2 残余应力对裂纹闭合	
6.4.3 三维应力强度因子修正	149	影响	223
6.5 激光冲击改性裂纹扩展速率		8.5.3 耐热钢表面残余应力松弛	
估算	152	规律	226
6.5.1 激光冲击改性裂纹单元		参考文献	227
模型	154	第9章 其他激光改性延寿	
6.5.2 冲击载荷的应力强度		技术	231
因子	155	9.1 激光熔覆改性	231
6.5.3 激光冲击改性裂纹的		9.1.1 激光熔覆改性概述	231
扩展速度	156	9.1.2 激光熔覆材料	232
参考文献	158	9.1.3 激光熔覆工艺	236
第7章 铝合金激光冲击改性		9.1.4 熔覆改性防开裂	238
延寿	163	9.1.5 激光熔覆改性应用	244
7.1 引言	163	9.2 激光合金化改性	247
7.2 铝合金试样激光冲击改性	164	9.2.1 激光合金化概述	247
7.2.1 改性准备工作	164	9.2.2 激光合金化改性理论	248
7.2.2 疲劳寿命分析	166	9.2.3 改性质量的控制	251
7.3 疲劳试样断口分析	178	9.2.4 典型激光合金化改性	253
7.4 裂纹扩展路径分析	187	9.2.5 激光合金化改性应用	257
7.5 裂纹扩展规律	189	参考文献	259

第1章 表面改性技术

20 世纪 80 年代英格兰伯明翰大学教授汤姆·贝尔 (Tom Bell) 提出表面工程的概念^[1]。他认为, 表面工程是“将材料表面与基体一起作为一个系统进行设计和改性。以期获得材料表面与基体本身都不可能有的优异性能, 其成本效益比是很高的。”这一论述十分精辟, 它充分说明了表面、材料与性能之间的正确关系, 表面技术和效益之间的关系, 以及表面工程的科学意义。我们可把汤姆·贝尔的这一阐述作为表面工程的经典定义。同时还可将表面工程定义为: 表面工程是近代技术与表面古典工艺相结合、繁衍、发展起来的, 它包括表面改性、薄膜和涂层三大技术, 它拥有坚实的理论基础科学, 并拥有表面分析、表面性能、表面层结合机理、表面失效机理、涂(膜)层材料、涂(膜)层工艺、施涂设备、测试技术、检测方法、标渡、评价、质量与工艺过程控制等形成表面膜层工程化规模生产的成套技术和内容。这两种定义具有互补性, 前者站在表面科学的高度, 阐明了表面工程的科学实质, 后者阐述了表面工程的具体内涵。

1.1 表面改性技术分类

利用现代技术改变材料表面、亚表面层的成分、结构和性能的处理技术称之为表面改性技术。表面改性技术主要包括以下 6 大类^[2]:

1) 表面形变强化。这项技术是采用高速弹丸打击或挤压或辊压金属零件的表面, 使其产生塑性变形, 由此引起表层显微组织的变化, 产生表层压应力, 从而提高抗应力腐蚀和抗疲劳断裂的能力, 改善和提高零件的可靠性和耐久性, 这项技术已经在航空、航天、机械、纺织、汽车、铁道等工业中得到了广泛的应用, 并作为这些行业设计人员的重要设计内容。

2) 表面热流强化。这是采用近代技术(如激光束, 电子束等)对金属零件的表面进行快速加热, 然后快速冷却, 使金属表面、亚表面形成新的相变区, 形成表面强化区的一项技术。这类技术是近代才发展起来的, 尤其是电子束、激光束是 20 世纪 60~70 年代才发展起来的。

3) 化学转化。这是将金属零件浸入一定的溶液介质中处理, 使其表面形成钝性化合物的膜层, 从而达到提高其表面性能的作用, 在金属表面上可以形成不同的膜层, 例如钝化——形成铬酸盐钝化膜, 磷化——形成磷酸盐膜, 氧化——在钢铁件上形成发黑或发蓝氧化膜的一项技术。降低表面粗糙度(磨光、抛光)

及表面着色也属于这一类。

4) 电化学转化。这是一种在电解质溶液中, 在外电流的作用下在制件表面形成氧化膜的技术, 称为阳极氧化, 也称为阳极化。镁、铝、钴及其合金易于形成这类阳极氧化膜层。这类膜层是一种含六角形显微孔隙结构的膜层, 利用这个特点, 可以用热水填充、用缓蚀剂填充、再加涂装, 近年有的学者还进行了填充润滑剂或磁性微粒材料的研究, 希望在润滑性能和记忆存储方面有新的进展。近几年来的一项重大进展是微弧等离子体阳极氧化, 极大地提高了表面硬度(达到 800 ~ 2500HV) 或形成新型彩色装饰膜层, 该技术可望用于与摩擦磨损有关的行业或新型建筑行业。

5) 离子注入。这是利用真空系统中离化出的离子, 在高电压下加速、直接注入材料表面, 形成很薄的离子注入层, 从而改变材料表面的组成与结构, 达到改善材料表面性能的作用。20 世纪 70 年代用于元件掺杂取代热扩散工艺, 使半导体的精细掺杂加工技术产生了突破性的进展, 已广泛用于半导体器件生产。后来, 发现离子注入还可以用于改善金属与合金材料的摩擦磨损特性, 提高抗氧化能力、提高耐蚀性, 此外还用于陶瓷、聚合物、绝缘体等的表面改性研究。

6) 表面合金化。将金属或非金属(溶质原子)沉积在基体金属表面上, 通过扩散作用渗入到基体金属表面内, 改变表面的化学组成、相结构, 从而达到提高表面性能的作用。如: 提高表面抗高温氧化、耐热腐蚀、耐电化学腐蚀, 耐摩擦磨损、耐酸、耐碱等。

1.2 表面改性技术的发展和應用

1.2.1 表面改性技术的发展

表面改性技术的近代进展十分惊人, 突出表现在以下几个方面:

(1) 激光束表面改性

激光技术的发展, 使世界科学与工业发生了新的飞跃。激光加工技术是六、七十年代发展起来的一种新工艺, 具有不接触、无污染、热影响区域小, 加工精密以及经反射镜可转向等特点。它的这些优异性能, 越来越受到人们的青睐。被广泛地应用在机械、电子、化工、航空航天、仪器仪表、医疗及金属材料等部门。事实证明, 激光技术比其他方法更快、更好、更经济、更方便。

1960 年世界上第一台红宝石激光器问世, 1974 年美国通用汽车公司将激光技术与表面热处理技术相结合, 进行激光表面相变处理, 使汽车转向器箱体内部(可锻铸铁)耐磨性提高 10 倍; 如果采用比相变硬化时更高的激光能量(约 10^5 W/cm^2), 使金属表面快速熔化, 然后快速冷却, 可获得较厚的硬化层(有的可

达1mm),称为激光熔凝处理;若激光能量再提高到 $10^7 \sim 10^8 \text{ W/cm}^2$ 进行处理,可获得表面非晶态结构,称为激光上釉;若在表面沉积一层单元或多元合金元素,再进行激光处理,可形成激光表面合金化,也可能形成激光熔覆涂层。激光与电镀结合构成激光喷射电镀,例如激光喷射镀金可达 $12 \mu\text{m/s}$,快速、精细,这是一种全新概念的表面技术,比传统电镀速度提高几百倍。激光技术是20世纪中后期发展起来的一门新兴技术,将激光技术应用于材料加工方面,逐步形成了一种崭新的加工方法——激光加工。近年来,由于激光光源性能的提高,激光微细加工技术得到了迅速发展,广泛应用于加工各种金属、陶瓷、玻璃、半导体等材料的具有微米级尺寸的微型零件或装置,是一种极有前途的精密微细加工方法。激光微细加工方法很多,可归纳为激光去除加工、激光表面改性、激光焊接等几大类,具体加工方法有打孔、切割、微调、动平衡、刻蚀、固态相变、合金化、涂覆、熔凝、焊接、激光存储等。

激光加工的加工方法不同,被加工材料不同,其加工机理也不尽相同。当能量密度极高的激光束照射在加工表面上时,一部分从材料表面反射,另一部分透入材料内其光能被吸收,并转换为热能,使照射区域的温度升高、熔化、汽化和熔融溅出从而去除材料,如打孔、切割、电阻微调、动平衡等。可以说,激光加工的机理是热效应。

如激光焊接时只要将材料加热到熔化程度而不要求去除,激光热处理只要求材料加热到相变温度。一般非金属材料的反射率比金属低的多,故吸收的激光能量也多。有机材料一般具有较低的软化点,有些有机材料在吸收了激光能量后,内部分子产生激烈振荡,致使靠聚合物作用而形成的大分子被解聚,部分材料变成了气态,激光切割有机玻璃时就是采用这种原理。

一般激光加工主要有以下特点:

1) 加工精度高。激光束光斑直径可达 $1 \mu\text{m}$ 以下,可进行超微细加工;同时它又是非接触式加工,无明显机械作用力,加工变形小,易保证较高加工精度。

2) 加工材料范围广泛。激光加工的对象包括各种金属和非金属材料,对陶瓷、玻璃、宝石、金刚石、硬质合金、石英等难加工材料的加工效果非常好。

3) 加工性能好。激光加工对加工场合和工作环境要求不高,不需要真空环境,也不用对X射线进行防护;激光加工还可透过玻璃等透明材料进行,可以方便地在某些特殊工况下进行加工,如在真空管内部进行焊接加工等。

4) 加工速度快、效率高。

虽然激光加工具有上述优点,但由于激光加工影响因素较多,因此其精密微细加工精度(尤其是重复精度和表面粗糙度)不易保证。加工时必须反复试验,选择合理参数,才能达到加工要求。由于光的透射作用,对于一些透明材料的加工必须预先进行色化或毛化处理。

激光加工的传统范围,包括切割、热处理、焊接等。除了在这些应用中继续发展外,激光技术还将在其他新的应用方面发展,尤其对大量具有小孔或微细沟槽复杂结构的电子器件、医疗和汽车制品更具有重大意义。因为随着工业和技术的不断发展,这些制品孔的直径和沟槽尺寸越来越小,而这些尺寸的公差越来越严格。只有用激光方法才能满足对零件提出的从 $1\mu\text{m}$ 到 1mm 的所有要求。与加工材料的普通技术相比,激光加工材料减小热作用区域,可以准确地控制加工范围和深度,保证高的重复性,具有良好的边缘和广泛的通用性。

(2) 电子束表面改性

20 世纪 70 年代初电子束进入表面改性领域^[3],它也是一种高能量的加工技术,能量密度可达 $10^9\text{W}/\text{cm}^2$,其能量的传递主要通过电子束的电子与金属表层电子碰撞,所传递的能量以热能的形式传给金属表面原子,致使被处理的金属表面温度迅速升高。它也可像激光束一样,与表面热处理技术相结合,形成表面热处理技术。通过电子束表面改性可以提高材料的耐磨耐蚀和高温使用等性能,并得到一定的应用。目前主要用于汽车制造业和宇航工业,尚需进一步深入研究并拓展电子束表面改性在各行各业中的应用。

(3) 离子束表面改性

20 世纪 70 年代中期离子注入进入半导体材料表面改性,进行精细掺杂,引发重大变革,20 世纪 70 年代末期离子注入、离子刻蚀和电子曝光技术的结合形成集成电路飞速发展,为当今微电子技术的发展做出了重大贡献。离子注入在半导体工业的应用成功,激发了人们将离子注入技术应用于金属、陶瓷、高分子聚合物等材料的改性。20 世纪 70 年代中期,发展了纯束流氮离子注入技术,并开始走向一定规模的工业生产^[3]。强束流脉冲注入,金属蒸发真空弧离子源和其他离子源的问世,为离子束材料的表面改性提供了强金属离子束技术,为基础研究和新材料及其应用研究提供了先进的技术工具并取得了许多离子注入实际应用的可喜进展。离子注入可以在不改变材料表面精度、粗糙度和外形尺寸的情况下,对材料表面进行改性,提高金属表面耐蚀性、耐磨性、改进陶瓷表面韧性,还可引发高分子材料交联、降解、石墨化改善其性能。

1.2.2 表面改性技术的应用

前面介绍了现代表面改性技术的概念和发展,可见其功能和作用是十分广泛的。

因为任何物体都包含表面或界面,各种产品或建设工程都是由各种单个的零件通过表面连接在一起组成的,这些表面(含界面)不仅要满足运行工况的要求,而且要承受气候环境的侵蚀作用。任何产品、任何建设工程都不可能回避表面或界面,而腐蚀从表面开始、磨损在表面进行、装饰美化在表面、疲劳因表面损伤面加速等均离不开表面。这些表面与制作部件的整体材料相比,厚度薄,面

积小,但却承担着工作部件的主要功能。所以任何产品、任何建设工程都要善待表面,处理好表面,设计好表面,才能保证产品建设工程的性能和质量。

零件或材料的表面改性,其作用就在于^[4]:

1) 通过表面改性,提高材料或零件的耐蚀性、抗高温氧化性、提高其对周围环境和工作环境抗侵蚀能力。

2) 通过表面改性,提高耐热、导热、隔热、吸热、热反射的性能。

3) 通过表面改性,赋予材料特定的物理特性,如导电、绝缘、半导体特性、超导、电磁屏蔽、发光、消光、光反射、光选择吸收、雷达波“隐身”、红外“隐身”、亲油、亲水、亲某种涂层、习焊、粘着、传感等。

4) 通过表面改性,赋予材料声、光、磁、电转换的特种功能,例如录音带、录像带等。

5) 通过表面改性,赋予材料特定的化学特性,如耐酸、耐碱、耐特种液体、催化等。

6) 通过表面改性,赋予制件表面装饰特性,如鲜艳的色彩、图文、非金属制件表面金属化、抗老化等。

1.3 激光表面改性技术

激光自1960年问世后便很快在实际工业生产中得到应用,其后随着对有关基本理论研究的不断深化,各类激光器件不断发展,其应用领域不断拓展,应用规模不断扩大。如今,激光技术已在工业、农业、医学、生物、军事以及人们的现代生活中得到了广泛的应用,从激光微细加工到激光核聚变,从视听装置、激光通信到捕捉、跟踪和测量飞行目标。由于激光具有“四高”特性,即高亮度、高方向性、高单色性和高相干性,因而在工业生产中作为一种“万能”的工具,发挥着日益巨大的作用。和激光切割、焊接相比,激光表面改性技术的应用相对较小,但其各种机理的研究是目前十分活跃的领域。

1.3.1 激光表面改性技术概述

科学技术的发展,对精密机器及零部件的精度、性能和寿命的要求越来越高,其使用环境也变得更加苛刻,许多机器必须在高压、高温、高腐蚀气体及高真空中工作。例如,航空航天工业对材料的选择及零部件表面性能更为严格,零部件的设计制造不仅要满足精强度要求,而且还要求具有良好的抗疲劳性能。现代飞机的研制更是对结构质量比的要求越来越高,即要求固有应力水平高的结构能具有长寿命和高可靠性。但是零部件,特别是大型结构件在制造加工过程中难免会存在缺陷或裂纹,在结构设计时不可避免地存在着应力集中区域,从而容易

产生不易被人们警觉的灾难性疲劳破坏,所以材料的表面处理在现代工业产品中越来越重要,尤其是对金属材料的表面强化处理在机械制造行业中显得尤为迫切。可以这么说,凡是在实际使用中担当某一功能的零部件,都要求其表面具有一定的物理力学性能和组织结构。为此,人们研究开发了多种表面处理技术与工艺来改善材料的表面性能,以满足日益增长的需求。传统的金属表面处理方法有:表面硬化法(高频感应加热淬火、火焰淬火、渗碳淬火及渗氮等)、扩散渗透表面处理法(锌扩散渗镀法、铬扩散渗镀法、硅扩散渗镀法及硼化处理等)、金属保护膜法(电镀、熔融浸镀、金属喷镀、化学镀及真空蒸镀)、防锈保护膜法(铝及铝合金的防锈保护膜、镁合金的防锈保护膜等)、电化学处理(电解抛光和化学抛光、阳极氧化)、喷丸处理、孔冷挤压及干涉配合等技术。这些表面改性技术的广泛应用,产生了显著的经济效益,但也有一定的局限性。从20世纪70年代以来,高能激光束、离子束及电子束用于材料的表面处理,从而开辟了材料科学中最引人注目、最富有生命力的新领域。

激光表面改性技术在汽车、机械、航空等工业部门日益受到广泛的重视和推广,用于处理发动机零部件、回转配合体零件以及涡轮叶片等,在经济效益和项目开发上呈不断上升的趋势。美国福特汽车公司、日本丰田和三菱等汽车公司采用激光淬火对汽车发动机零部件进行处理,取得良好效果。并且已成功用于齿轮箱、气缸表面、胀圈(活塞环)槽、阀座等零件的表面硬化处理。五十铃汽车发动机挺杆,以及传动装置的同步器中的挡环等形状复杂的零件也采用激光淬火技术。美国通用公司完成转向器壳体内腔激光淬火的研究,耐磨性提高10倍^[21]。

激光淬火适用于变形很敏感的零件的淬硬,可对零件的特殊区域(深孔内壁、不通孔底部等)进行硬化。美国研究用激光硬化飞机重载齿轮,以取代渗碳淬火化学热处理^[29]。激光淬火的齿轮包括AH-64直升机辅助动力装置的行星齿轮及飞机主传动装置的传动齿轮。由于激光硬化飞机重载齿轮不需要最后研磨,故可大大降低生产成本,提高生产率。激光也可用于飞机叶片的淬硬,叶片材料是 $X_{20}Cr_{13}$,对热处理过程特别适合。用激光淬火的产品零件还有仪表零件、液压泵零件、液压工作缸、马达轴花键、量具和刀具等。

欧美一些国家在汽车发动机的排气阀阀座表面涂覆具有耐磨耐热的硬质合金涂层。英国某发动机公司已采用微处理机控制的自动送粉激光涂覆工艺取代手工氩弧堆焊,在涡轮叶片上涂覆钴基合金,改善其高温耐腐蚀性,可得到无气孔,无裂纹,稀释率仅为1%~2%的高性能涂覆层^[30]。加工时间从14min减到75s,成本降低85%;重复性好,加工精确,省去研磨工序,贵重的钴基包覆合金的消耗量减少50%。可用于航空零件的修复,以提高抗疲劳性能^[21]。在制造电器接触器时,用激光包覆取代化学镀覆,在铜基体上包覆银层,大大提高生产率并降低成本。J Majumdar等用激光把奥氏体不锈钢与SiC混合粉末直接激光熔覆在

奥氏体不锈钢的表面。奥氏体不锈钢粉末与 SiC 粉末的混合比例分别为 95:5 和 80:20, 激光器的功率为 700 ~ 1000W。试验得到了激光熔覆的最优工艺参数, 最大的显微硬度范围是 650 ~ 825HV^[22]。

对于承受交变载荷的零部件, 既要求具有很好的韧性, 又要求具有很高的强度及耐磨损性。这时可用韧性较高的材料制成零件, 然后再进行表面合金化处理。美国某公司在 AISI4815 钢零件表面涂上 C、Cr 细粉后用 10kW 的 CO₂ 激光以 48mm/s 的速度扫描, 获得 1.3mm 厚的合金化层。其铬的质量分数约 20%, 而且分布均匀。合金层硬度达 55HRC, 母材硬度 33HRC。整个零件保持了相当好的韧性, 由于零件表面是细枝晶组织, 所以在高温下也能保持很高的硬度^[31]。R·Jagdheesh 等以奥氏体不锈钢作为基体材料, 选择 Ni 和 TiC 为主要的增强相, 采用激光表面合金化技术成功制备了 Ni 和 TiC 颗粒增强合金化层。实验在不同的激光表面合金化条件下对比了不同的粉末组合所形成的合金化层。分析和检测显示, 在 20% Ni-80% TiC (质量分数) 的粉末混合比例下激光表面合金化涂层显微硬度达到 733HV^[23]。

近几年来, 激光表面改性技术在模具制造业中的应用也日益加强, 在生产过程中, 模具表面承受着各种形式的复杂应力 (包括摩擦、挤压等), 这将限制模具的使用寿命。研究表明, 模具的失效多发生在模具表面。为了提高模具的使用寿命, 传统的方法是对模具表面进行热处理和使用优质材料做成镶块安装于模具易磨损、破坏的部位 (如凹模刃口、圆角部位等), 这给模具的制造、安装、调试带来了较多的困难, 制造成本也较高。对于大中型覆盖件模具的工作表面, 也很难采用传统的热处理方法来对其表面进行强化处理。目前常用的仍然是手工火焰淬火处理, 这种方法在很大程度上取决于操作人员的技巧, 容易因受热不均造成表面变形, 从而影响到模具的使用质量。而采用激光表面强化技术能有效解决传统强化技术难以实现的技术指标, 不但能提高模具表面强化硬度 (比常规方法平均高 15% ~ 20%) 从而提高模具的耐磨性, 而且模具表面激光强化是最后一道工序, 不必进行后续加工, 即工件几乎不变形。这在很大程度上可简化模具制造工艺。

激光表面改性技术的发展, 也改变了传统的新产品开发设计方法, 零件经激光表面改性处理后, 其附加值将成倍增加。常用材料及零部件经激光表面处理后, 提高了性能, 延长了使用寿命。采用激光冲击改性处理具有如下突出优点:

- 1) 激光是一种高密度能源, 可快速、局部地加热材料, 并实现局部急热和急冷, 可用于其他方法不能处理的沟槽类零件的处理。
- 2) 易于处理高熔点材料、耐热材料及高硬度材料等。
- 3) 可在大气、真空及各种气体环境中进行处理。
- 4) 可改变激光参数, 实现不同的表面处理工艺。

5) 是一种非接触式处理, 工件变形极小, 省去校直和精磨等工序。

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, 对复杂工件表面进行处理, 因此是一种极具柔性的加工方法。

1.3.2 激光表面改性技术分类

随着大功率激光器的出现, 激光被用于材料的表面改性处理, 出现了众多的激光表面处理新技术。由于激光表面处理技术是近 20 年才发展起来的新技术, 所以, 目前人们对此还没有形成统一的称呼。除了“激光表面处理”之外, 还有“激光强化”、“激光热处理”及“激光表面优化”等名称。对于各种激光表面技术的分类也不尽相同, 日本中村英将激光表面处理分为表面热处理、表面熔化处理及表面冲击处理三类^[5]。日本安永畅男将激光表面处理分为 CVD、PVD、扩散及结构控制四类。其中扩散类包括合金化、陶瓷化及堆焊, 结构控制类包括淬火、回火、非晶化、熔融硬化及磁区控制四种。我国一些学者将激光表面改性技术分成对材料表面组织本身进行改性的方法及通过包覆进行改性的方法两大类, 或分为激光表面热处理(淬火及退火等)、激光表面熔化法(表面合金化、非晶化、表面涂覆、细化组织、材料合成)及表面冲击法(冲击硬化)三类。但是, 根据激光与物质相互作用所产生的效应不同, 可将众多的表面处理技术分成两大类。第一类主要利用激光产生的力学效应, 即激光与材料相互作用所产生的热应力或冲击波(应力波)来改善材料的性能或形状, 第二类是主要利用激光与材料相互作用所产生的热效应来改善材料的性能的表面处理技术, 又可分为两类, 即将材料表面加热到非熔化状态的处理技术和将材料表面加热到熔化状态的处理技术。图 1-1 列出了激光表面改性技术的组成分类。

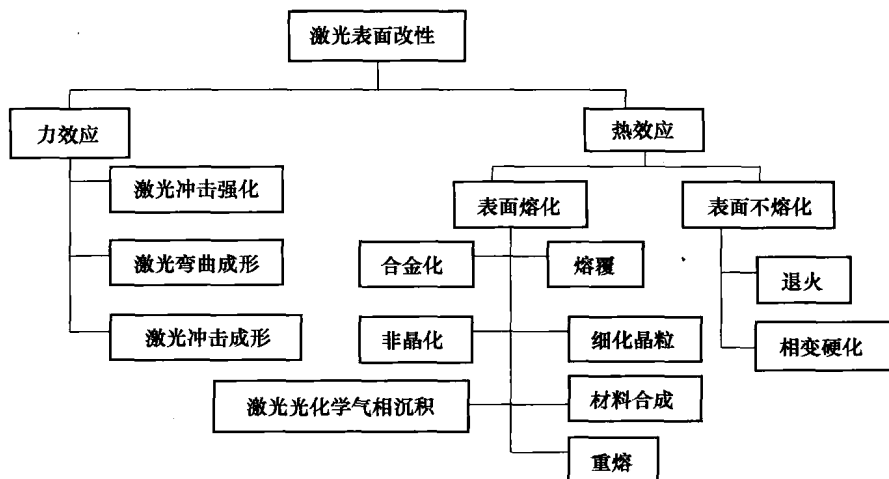


图 1-1 激光表面改性技术的组成分类

1.4 利用力效应的激光表面改性技术

目前,利用力效应的激光表面改性技术主要有两种,一种是利用材料热膨胀所产生的热应力使材料发生塑性变形,称为激光热应力成形。第二种是利用在材料内部产生的应力波来改善材料性能,称之为激光冲击改性,这也是本书后面几章将要重点介绍的内容。另外,利用激光和物质相互作用产生冲击波的压力来实现金属板料的冷塑性成形的研究也正在研究之中。

随着现代工业的飞速发展,产品对市场的响应日益迅速,生产周期越来越短,为此,在20世纪80年代初,提出了激光快速原型制造技术概念,利用快速制造技术可以大大节省或缩短了产品研制周期,它有利地推动和改善了金属塑性加工技术,特别是模具制造技术,从而引起了广泛的关注。但是激光快速原型制造生产出的是产品或部件的模型,常常是一些聚合树脂或纸制品。所以它们缺乏强度、刚度热物性和其他金属构件具有的性质。另外这些商业化的快速原型制造系统不适合生产板料或截面较薄的零件。克服这些缺点的方法是快速制造出这样的模型,它们不但与最终产品几何形状、结构形式相同,而且材料的特性也相近或完全一致,这样的模型用于评测或展示产品的特征,利用激光塑性成形技术可以解决这一问题。另外,激光成形技术也适合生产单件或批量小的产品。在金属板料生产中,往往是一个零件要成千上万的进行大批量的生产,精度要求很高,涉及到模具制造等大量工艺。这样,由于生产的专用工具成本高、研制周期长,而使许多单件或小批量金属板料加工利润不大。同样的原因,零件的改进和变型常常需要重新制作一些工具,这样就导致了加工成本的增加和工期的延误。

激光热应力成形是国外20世纪80年代提出的一种新的金属构件成形方法,1985年,日本学者Y Namba首次公布了用激光成形技术构建宇宙空间站的设想^[6]。以S45C碳钢激光硬化处理为例研究了板料的温度分布和热变形,提出了一种在不加外力的条件下,利用激光诱发的热应力来实现板料塑性变形的新工艺——激光成形,并用简单的弯曲试验证实了板料激光成形的可能性。它利用激光扫描金属薄板时,在热作用区域内产生的强烈温度梯度而诱发的热应力,使板料实现塑性弯曲变形,其成形过程如图1-2所示,并于1987年发表了他关于金属板材成形的研究成果,

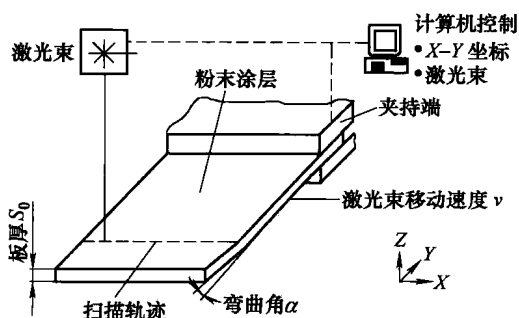


图 1-2 激光热应力成形过程示意图

注:该图取自参考文献[14]。