



“十二五”国家重点出版规划项目

国家出版基金项目

NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

现代激光技术及应用丛书

激光再制造

徐滨士 董世运 等编著

Laser Remanufacturing Technology



国防工业出版社

National Defense Industry Press



“十二五”国家重点出版规划项目

/现代激光技术及应用丛书/

激光再制造

徐滨士 董世运 等编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书介绍了再制造的重要意义及其产业发展现状,阐述了激光再制造技术发展及其作用,介绍了激光再制造技术原理及激光再制造形成理论等。重点从激光再制造零件组织性能和缺陷特征、激光再制造零件“控形”与“控性”、典型合金零件激光再制造、激光再制造在装备中的实际应用等多个方面,介绍了激光再制造的新研究成果。

本书可作为高等院校材料加工专业教材,也可供相关专业研究人员和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

激光再制造/徐滨士等编著. —北京:国防工业出版社,
2016.3

(现代激光技术及应用丛书)

ISBN 978-7-118-10655-8

I. ①激… II. ①徐… III. ①激光加工 IV. ①TG665

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 053672 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 710×1000 1/16 印张 17½ 字数 338 千字

2016 年 3 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 88.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

丛书学术委员会 (按姓氏拼音排序)

主 任	金国藩	周炳琨		
副主任	范滇元	龚知本	姜文汉	吕跃广
	桑凤亭	王立军	徐滨士	许祖彦
	赵伊君	周寿桓		
委 员	何文忠	李儒新	刘泽金	唐 淳
	王清月	王英俭	张雨东	赵 卫

丛书编辑委员会 (按姓氏拼音排序)

主 任	周寿桓			
副主任	何文忠	李儒新	刘泽金	王清月
	王英俭	虞 钢	张雨东	赵 卫
委 员	陈卫标	冯国英	高春清	郭 弘
	陆启生	马 晶	沈德元	谭峭峰
	邢海鹰	阎吉祥	曾志男	张 凯
	赵长明			

世界上第一台激光器于1960年诞生在美国,紧接着我国也于1961年研制出第一台国产激光器。激光的重要特性(亮度高、方向性强、单色性好、相干性好)决定了它五十多年来在技术与应用方面迅猛发展,并与多个学科相结合形成多个应用技术领域,比如光电技术、激光医疗与光子生物学、激光制造技术、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、激光同位素分离、激光可控核聚变、激光武器等。这些交叉技术与新的学科的出现,大大推动了传统产业和新兴产业的发展。可以说,激光技术是20世纪最具革命性的科技成果之一。我国也非常重视激光技术的发展,在《国家中长期科学与技术发展规划纲要(2006—2020年)》中,激光技术被列为八大前沿技术之一。

近些年来,我国在激光技术理论创新和学科发展方面取得了很多进展,在激光技术相关前沿领域取得了丰硕的科研成果,在激光技术应用方面取得了长足的进步。为了更好地推动激光技术的进一步发展,促进激光技术的应用,国防工业出版社策划组织编写出版了这套丛书。策划伊始,定位即非常明确,要“凝聚原创成果,体现国家水平”。为此,专门组织成立了丛书的编辑委员会,为确保丛书的学术质量,又成立了丛书的学术委员会,这两个委员会的成员有所交叉,一部分人是几十年在激光技术领域从事研究与教学的老专家,一部分是长期在一线从事激光技术与应用研究的中年专家;编辑委员会成员主要以丛书各分册的第一作者为主。周寿桓院士为编辑委员会主任,我们两位被聘为学术委员会主任。为达到丛书的出版目的,2012年2月23日两个委员会一起在成都召开了工作会议,绝大部分委员都参加了会议。会上大家进行了充分讨论,确定丛书书目、丛书特色、丛书架构、内容选取、作者选定、写作与出版计划等等,丛书的编写工作从那时就正式地开展起来了。

历时四年至今日,丛书已大部分编写完成。其间两个委员会做了大量的工作,又召开了多次会议,对部分书目及作者进行了调整。组织两个委员会的委员对编写大纲和书稿进行了多次审查,聘请专家对每一本书稿进行了审稿。

总体来说,丛书达到了预期的目的。丛书先后被评为国家“十二五”重点出

版规划项目和国家出版基金资助项目。丛书本身具有鲜明特色:一)丛书在内容上分三个部分,激光器、激光传输与控制、激光技术的应用,整体内容的选取侧重高功率高能激光技术及其应用;二)丛书的写法注重了系统性,为方便读者阅读,采用了理论—技术—应用的编写体系;三)丛书的成书基础好,是相关专家研究成果的总结和提炼,包括国家的各类基金项目,如973项目、863项目、国家自然科学基金项目、国防重点工程和预研项目等,书中介绍的很多理论成果、仪器设备、技术应用获得了国家发明奖和国家科技进步奖等众多奖项;四)丛书作者均来自于国内具有代表性的从事激光技术研究的科研院所和高等院校,包括国家、中科院、教育部的重点实验室以及创新团队等,这些单位承担了我国激光技术研究领域的绝大部分重大的科研项目,取得了丰硕的成果,有的成果创造了多项国际纪录,有的属国际首创,发表了大量高水平的具有国际影响力的学术论文,代表了国内激光技术研究的最高水平。特别是这些作者本身大都从事研究工作几十年,积累了丰富的研究经验,丛书中不仅有科研成果的凝练升华,还有着大量作者科研工作的方法、思路和心得体会。

综上所述,相信丛书的出版会对今后激光技术的研究和应用产生积极的重要作用。

感谢丛书两个委员会的各位委员、各位作者对丛书出版所做的奉献,同时也感谢多位院士在丛书策划、立项、审稿过程中给予的支持和帮助!

丛书起点高、内容新、覆盖面广、写作要求严,编写及组织工作难度大,作为丛书的学术委员会主任,很高兴看到丛书的出版,欣然写下这段文字,是为序,亦为总的前言。

金国藩 周炳琨

2015年3月

节能减排、可持续发展、应对气候变化已成为社会发展的重大主题。进入 21 世纪以来,随着国家发展循环经济,建设资源节约型、环境友好型社会等政策的贯彻实施,再制造工程的发展迎来了快速发展的春天。经过 10 余年的发展,再制造已经发展到产业化阶段,在国防、交通、能源、冶金、化工等多领域的节能减排中发挥越来越显著的作用。激光再制造作为再制造核心技术之一,是一种集光、机、电于一体的先进再制造技术,在再制造产业发展中具有重要地位,在国防装备维修保障和国民经济多领域装备修复中获得了大量应用,创造了巨大的经济效益和社会效益,并且其应用范围不断扩大。激光再制造已成为具有中国特色、自主创新的再制造产业的关键技术支撑,为我国先进制造和绿色制造技术发展以及装备制造服务业发展注入了活力,有力推动了装备制造业的技术进步。

激光再制造技术一直以来都在不断完善和充实。理论上,激光再制造在有关学科交叉渗透的基础上形成了具有特色的技术理论;应用上,激光再制造工程已深入到国民经济的方方面面,并将产生越来越大的经济效益和社会效益。并且,近年来,随着我国循环经济发展和制造业转型升级,从事激光再制造技术研究和应用的从业人员不断增多,但目前国内外还没有激光再制造方面的专门著作,因此激光再制造技术和再制造产业发展也亟需相关著作出版。多年来,作者一直基于激光熔覆等激光材料加工技术原理,开展激光再制造理论与技术研究,能够把多年科研、教学和工程实践的成果及思考探索所得,总结为一本书,与同行分享,也算是一件幸事。

激光再制造是绿色再制造先进技术之一,以其独特的技术优点,已成为再制造领域的一个极具活力的热门方向。激光再制造是基于激光熔覆等材料激光沉积技术原理,实现零部件损伤部位的尺寸恢复和零部件性能恢复甚至提升。它综合了激光熔覆和快速成形等技术优点,既可以有效恢复、提升失效零件表面的耐磨、耐蚀、耐高温、抗疲劳等性能,又可针对缺损零件局部部位进行体积成形、

恢复原始尺寸,也就是说,它既可以进行二维再制造(表面损伤),又可以进行三维(体积损伤)再制造。从该方面考虑,这也是激光3D打印原理和技术在再制造领域的应用。近年来,随着激光增材制造、激光3D打印等成为先进制造、绿色制造和激光材料加工等领域的热门话题和研究热点,激光3D打印领域的研发和从业人员主要考虑如何在新产品设计研发和制造过程中发挥3D打印的技术优势。但大家也认识到,针对成熟产品制造而言,与基于工厂生产线的传统生产方式相比,激光3D打印效率低、成本高,难以在工业大生产中推广应用,因此大家感觉激光3D打印被局限在了创新设计、新品试制和特殊件单件生产等有限领域。而基于金属激光沉积原理的激光再制造技术,在技术基础理论方面与金属激光3D打印具有相通之处,且具有耗材少、效率高、效益大、节能环保等优势,符合生态文明建设需求以及中国制造2025等政策和规划方向,应用领域宽广、发展前景广阔,因此激光再制造也为激光3D打印技术拓展了发展方向和空间。

为了与有关学者、工程技术人员共同推进激光再制造理论与技术的发展,作者抛砖引玉,以所带领团队多年研究成果为主,参考和综合国内外相关研究成果,编写了本书。全书包括七章内容。第1章在介绍再制造概念、特点及其产业现状的基础上,阐述激光再制造技术优势、研究应用现状及其重要意义,主要由徐滨士和董世运撰写。第2章从激光与材料相互作用、激光再制造过程的冶金规律、激光再制造中的“控形控性”理论和激光再制造界面匹配性等方面,阐述激光再制造技术基础知识,主要由董世运、闫世兴和方金祥撰写。第3章从激光再制造设备系统、技术方法、工艺流程等方面,介绍了激光再制造技术体系,由闫世兴、王玉江和张智慧等撰写。第4章总结了激光再制造沉积材料和基体材料体系,并重点介绍了钢铁、铝合金和钛合金零件激光再制造成形层的组织和缺陷特征,由王玉江、闫世兴和方金祥等撰写。第5章阐述了金属零件激光再制造成形规律、形状预测、成形形状控制及精度控制等方面的理论和技术方法,由董世运、王志坚和任维彬撰写。第6章结合应用实例,阐述了激光再制造零件质量无损评价技术方法,主要由徐滨士、刘彬、石常亮和朱学耕等撰写。第7章主要结合装备金属零件激光再制造实例,介绍激光再制造技术在钢铁冶金、石油化工、

飞机舰船、重载车辆等不同工业领域的实践应用,并展望激光再制造技术的应用发展前景,主要由徐滨士、董世运和王玉江等撰写。全书由徐滨士、董世运和闫世兴统稿。

本书反映的研究工作得到了国家自然科学基金项目、国家 973 项目等国家项目以及原总装备部预研项目、装备维修改革与科研项目等军队大量科研项目的资助,同时得到了多家工厂企业和科研院校合作单位的大力支持。在此,向相关单位和个人的热情帮助和支持表示衷心感谢,并向书中参考文献的作者致以敬意。

装备再制造属于战略性新兴产业,激光再制造作为先进再制造技术,其相关技术理论、技术方法和工业应用发展迅速,限于编著人员水平,书中不当之处,恳请读者指正并提出宝贵意见。

作者

2015 年 10 月

第1章 绪论

1.1 再制造基本概念、特点与技术体系	001
1.1.1 再制造的概念与特点	001
1.1.2 再制造成形技术体系	003
1.2 再制造创新发展及其产业化现状	007
1.3 材料激光加工技术现状	010
1.4 激光再制造技术特点及其分类	011
1.5 激光再制造技术的发展	014
1.6 激光再制造技术的意义	015
参考文献	017

第2章 激光再制造技术基础

2.1 激光与材料相互作用规律	020
2.1.1 材料对激光的吸收规律	021
2.1.2 影响激光能量吸收的因素	023
2.1.3 激光与金属粉末作用规律	024
2.2 激光再制造成形中的冶金规律	032
2.2.1 合金元素对熔覆层冶金性能的影响	032
2.2.2 激光再制造成形快速凝固机理	035
2.2.3 激光再制造成形中的成分分布	036
2.3 激光再制造的材料匹配性	041
参考文献	042

第3章 激光再制造技术体系

3.1 激光再制造成形设备	044
3.1.1 激光再制造成套系统	044
3.1.2 激光再制造成形硬件系统	048

3.1.3	激光再制造成形软件系统	052
3.2	激光再制造技术方案设计	059
3.2.1	激光再制造专用材料方案设计	059
3.2.2	激光再制造工艺方案设计	061
3.3	激光再制造流程	066
3.3.1	损伤零件清洗	067
3.3.2	损伤零件失效分析与缺陷检测	069
3.3.3	失效零件再制造前处理	073
3.3.4	失效零件激光再制造成形	073
3.3.5	再制造成形毛坯件后处理	077
3.3.6	再制造成形毛坯件可靠性评估	078
3.3.7	再制造成形毛坯件效益评估	079
	参考文献	080

第4章 激光再制造材料及其成形组织与缺陷特征

4.1	激光再制造材料体系	081
4.1.1	自熔剂合金粉末	081
4.1.2	陶瓷粉末	083
4.1.3	复合粉末	084
4.1.4	其他金属体系	085
4.2	钢铁激光再制造成形组织及缺陷特征	086
4.2.1	单道成形组织	087
4.2.2	薄壁成形组织	096
4.2.3	多层堆积成形组织	100
4.2.4	钢铁激光再制造成形结构缺陷特征	107
4.3	铝合金激光再制造成形组织及缺陷特征	122
4.3.1	铝合金激光再制造意义	122
4.3.2	铝合金激光再制造难点、常见缺陷及解决措施	124
4.3.3	铝合金激光再制造材料体系	126
4.3.4	铝合金激光再制造实例	129
4.4	钛合金激光再制造成形组织及缺陷特征	133
4.4.1	钛及钛合金简介	133
4.4.2	钛合金零件的激光再制造	135
4.4.3	钛合金件激光再制造的组织特点	136
4.4.4	钛合金激光再制造存在的问题	138

参考文献	139
------	-----

第5章 激光再制造成形控制

5.1 激光再制造成形规律及其形状特征	144
5.1.1 再制造零件成形规律	144
5.1.2 再制造成形结构尺寸及尺寸不均匀特征	148
5.2 激光再制造成形的形状预测	154
5.2.1 激光成形过程的闭环控制	154
5.2.2 激光成形结构尺寸控制的关键	156
5.2.3 成形结构尺寸预测模型	157
5.2.4 模型理论预测精度分析	165
5.3 激光再制造成形金属结构的精度控制	168
5.3.1 精度控制总体原则	168
5.3.2 表面熔覆再制造成形精度控制	173
5.3.3 薄壁再制造成形精度控制	177
5.3.4 立体再制造成形精度控制	181
5.4 典型结构的激光再制造成形形状控制	183
5.4.1 磨损失效凸轮轴控形再制造	184
5.4.2 气门挺柱圆筒激光再制造成形	190
5.4.3 低载直齿轮断齿控形再制造	192
5.4.4 开裂肋板控形再制造	194
参考文献	196

第6章 激光再制造零件质量无损评价

6.1 再制造零件无损检测评价技术体系概况	197
6.2 激光再制造零件无损评价技术特征	198
6.2.1 超声波检测无损评价技术	198
6.2.2 磁记忆检测无损评价技术	201
6.2.3 涡流无损评价技术	203
6.2.4 X射线无损评价技术	205
6.2.5 其他无损评价技术	207
6.3 激光再制造零件质量无损评价	207
6.3.1 熔覆层组织分析	207
6.3.2 熔覆层近表层缺陷的检测	209

6.3.3 熔覆层内部缺陷的检测	211
6.3.4 熔覆层与基体结合界面缺陷的检测	214
6.3.5 熔覆层缺陷信号的识别	216
6.3.6 激光再制造熔覆层应力损伤的无损检测评估方法	217
参考文献	228

第7章 激光再制造在工业中的应用

7.1 在钢铁冶金行业中的应用	230
7.2 在石油化工行业中的应用	235
7.3 在船舶行业中的应用	237
7.4 在矿山机械行业中的应用	239
7.5 在燃煤发电行业中的应用	241
7.6 在装备备件伴随保障中的应用	242
7.7 存在的问题与应用前景	245
参考文献	248

在国家“以人为本,全面、协调、可持续的人口、资源、环境协调发展”的科学发展观的指导下,再制造工程已经成为发展循环经济、构建节约型社会的重要组成部分,国家在有关战略部署中明确提出了支持机械设备再制造,并把绿色再制造技术列为支持循环经济的关键性技术之一。

激光再制造技术是一项集光、电、机于一体,利用激光表面处理、激光烧结成形、激光焊接、激光切割、激光打孔等各种激光加工和处理技术对失效零部件进行再制造的一种先进技术。

激光具有单色性好、方向性好、相干性好及能量集中等优点,激光的这些特性决定了其具有不同于一般光源的用途。1960 年第一台红宝石激光器面世,激光技术即获得了迅速发展,并逐步在工业、农业、军事、交通等领域获得应用。20 世纪 80 年代,随着大功率激光器的成熟和应用,世界各国竞相研究开发激光在机械零部件制造和维修领域的理论与技术,如激光热处理、激光熔覆、激光合金化、激光熔凝等。90 年代,激光熔覆技术在金属零部件维修中开始获得了大量成功应用,激光快速成形技术也获得了快速发展,尤其金属零部件的激光直接成形技术已成为国际研究的热点。激光制造技术和激光再制造技术已经成为今后激光在机械工业领域研究和应用的重点。

激光再制造技术作为再制造工程中一项重要的先进技术,必将为国家发展循环经济、构建节约型社会做出贡献。

1.1 再制造基本概念、特点与技术体系

1.1.1 再制造的概念与特点

进入 21 世纪以来,随着科学技术的进步,以优质、高效、安全、可靠、节能、节材为目标的先进制造技术在全世界范围得到了飞速发展,机械设备朝着高精度、高自动化、高智能化方向发展,服役条件更加苛刻,因而对于机械零部件的维修要求更高,用传统维修手段难以达到要求。随着先进制造技术及设备工程的不断发展,制造与维修将越来越趋于统一。未来的制造与维修工程将是一个考虑

设备和零部件的设计、制造和运行的全过程,以优质、高效、节能、节材为目标的系统工程。先进制造技术将统筹考虑整个设备寿命周期内的维修策略,而维修技术也将渗透到产品的制造工艺中,“维修”已被赋予了更广泛的含义。

“再制造”一词来源于 1984 年美国“技术评论”,其提倡旧品翻新或再生。再制造作为一种先进的制造技术将迅猛发展,取代传统的维修手段。再制造具有深远意义,在再制造中大量采用各种维修技术,把因损坏、磨损或腐蚀等而失效的可维修的机械零件翻新如初,大量节省了因购置新品、库存备件和管理以及停机所造成的对能源、原材料和经费的浪费,并极大地减少了环境污染及废物的处理。再制造同时以修复技术和其他相关技术组合形成的先进再制造成形技术,能直接针对许多贵重零部件实现局部表面精密三维可控快速修复,并恢复损伤零件的使用价值。实际上,这等于延长了产品的使用寿命,减少了对原始资源的需求,节省了能源。中国工程院院士徐滨士教授在多年从事机械设备维修工程研究、表面工程研究的基础上,提出了再制造工程的概念:再制造工程是以产品全寿命周期理论为指导,以废旧产品性能实现提升为目标,以优质、高效、节能、节材、环保为准则,以先进技术和产业化生产为手段,来修复、改造废旧产品的一系列技术措施或工程活动的总称。简而言之,再制造工程是废旧产品高技术修复、改造的产业化。

面对 21 世纪和谐社会建设的需要,我们党为坚持科学发展观,做出了发展循环经济,保护生态环境,加快建设资源节约型、环境友好型社会的战略决策,并在有关部署中明确提出支持机械装备再制造,把绿色再制造技术列为支持循环经济的共性和关键技术之一。在党的第十七次全国代表大会的报告中,提出了“建设生态文明,基本形成节约能源资源和保护生态环境的产业结构、增长方式、消费模式”的要求。在此大背景下,我国再制造产业和相关再制造技术得到广泛关注和蓬勃发展。再制造是机械维修业进入高级阶段的具体表现,也是提高机械装备服役年限和现场维修的有效途经。同时,再制造产业的发展也响应了我国和人类社会对节能减排的要求。节能减排是指全国范围内减少资源能源的浪费和降低废气排放、废料排出等。我国“十一五”规划纲要提出:“十一五”期间单位国内生产总值能耗降低 20% 左右,主要污染物排放总量减少 10%。这是贯彻落实科学发展观、构建社会主义和谐社会的重大举措;是建设资源节约型、环境友好型社会的必然选择;是推进经济结构调整,转变增长方式的必由之路;是维护中华民族长远利益的必然要求^[1]。

我国国民经济和社会发展“十二五”规划纲要提出:绿色发展,建设资源节约型、环境友好型社会,大力发展循环经济,“十二五”期间,单位国内生产总值能源消耗降低 16%,单位国内生产总值二氧化碳排放降低 17%,工业固体废物综合利用率达到 72%,资源产出率提高 15%。

对损伤报废的机械零部件进行维修和再制造是节能减排的有效方法。再制

造和常规维修的最终目的是为了恢复损伤零部件的性能,使之与原新产品性能接近或相同。但是,再制造在很多地方又与维修不尽相同。目前,维修大多为一维或二维尺寸的修复,并常受待修零件形状的限制,且加工精度不高。典型的常规维修技术有电镀、电弧或火焰堆焊、等离子喷涂(焊)和激光熔覆等。再制造是一种全新概念的先进修复技术,再制造过程不受零件材料、形状、复杂程度的影响,加工精度和柔性较高,是一门新的光学、机械、电子、计算机、自动化、材料综合交叉的先进制造技术。再制造在许多加工工艺部分和测试技术方面与传统制造相同,可以直接利用某些传统制造技术和设备,如产品性能的检测技术和机械加工设备。

再制造具有显著的“绿色”特征,它既是一种节约资源、能源的节约型制造,又是一种保护环境的绿色制造。再制造对绿色的贡献表现在:避免废旧件的回炉对环境造成的二次污染;减少零部件后续制造过程(铸、锻、焊、车、铣、磨)的能源消耗和对环境的污染和危害;减少报废设备的直接堆放对环境造成的固体垃圾污染;通过技术改造可提高产品的绿色度。再制造还是先进制造的重要组成部分。信息技术、生物技术、纳米技术、新能源和新材料等高新技术的迅猛发展,为制造科技带来了深刻变化。机械设备经过若干年使用后才报废,期间许多新技术、新材料相继出现,对其进行再制造时可以应用最新的研究成果。高新技术在再制造加工中的成功应用是再制造产品在质量和性能上能达到和超过新品的根本原因。再制造能够充分挖掘废旧机电产品中蕴涵的高附加值。以汽车发动机为例,原材料的价值只占15%,而成品附加值却高达85%。再制造过程中由于充分利用废旧产品中的附加值,能源消耗只是新品制造的50%,劳动力消耗只是新品制造的67%,原材料消耗只是新品制造的15%^[2]。

1.1.2 再制造成形技术体系

再制造成形技术是再制造技术的主要组成。按照再制造成形过程中零件尺寸增减变化情况,再制造成形技术可以分为尺寸恢复法再制造成形和尺寸加工法再制造成形两种技术途径。其中,尺寸恢复法再制造成形不但可以恢复零件的原始设计尺寸,而且可以通过应用新材料提高零件性能,因此,又称为尺寸恢复与性能提升方法。纵观国内最近发展,重点在尺寸恢复法再制造成形技术方面获得了显著进展,并逐步实现了两种技术途径的融合创新发展。

1. 尺寸恢复法再制造成形技术

尺寸恢复法再制造成形技术是针对磨损、腐蚀等表面损伤零件和缺损、裂纹等三维体积损伤零件,采用先进表面工程技术、三维沉积成形技术等恢复零件损伤部位的几何尺寸,并通过优化再制造成形所用材料和工艺方法,恢复和提升零部件性能。针对表面损伤零部件的再制造成形,主要采用先进表面工程技术手段,因此,许多表面工程技术可以应用于再制造成形领域。

表面工程技术进步促进了再制造成形技术和再制造产业发展,尤其在高精

度高性能表面再制造成形方面取得了显著成绩。例如,采用气相沉积硬膜技术实现了发动机活塞密封环、气门挺杆盘面等的再制造成形,采用激光熔覆技术实现了凸轮轴、凸轮的再制造成形,采用等离子喷涂技术再制造成形发动机叶片表面热障涂层等,均实现了高精度、高性能表面的再制造成形和零件延寿,解决了困扰装备维修保障人员多年的技术难题。

在尺寸恢复法再制造成形技术领域的突破,可归纳为以下四个主要方面。

1) 三维体积损伤机械零部件的再制造成形技术

三维体积损伤机械零部件的损伤一般由应力或者外力作用引起,因此,该部位的再制造成形必须考虑到承受载荷能力。为此,对其再制造成形技术的基本要求是沉积成形金属具有优异的力学性能,并且在再制造成形过程中尽量不降低零件基体材料性能。

在三维体积再制造成形领域,采用的技术主要是通过各种热源熔化添加材料的能量束再制造成形技术,如激光熔覆再制造成形技术、等离子熔覆再制造成形技术、电弧堆焊再制造成形技术、高速电喷涂再制造成形技术等。

例如,装甲兵工程学院对重载车辆中难修复典型零件的激光再制造成形进行了系统研究,成功再制造成形了齿类件和薄壁件等三维损伤零件^[3]。激光再制造成形与等离子喷涂成形等多种再制造成形技术手段复合,实现了不同工业领域燃汽机、烟机以及航空发动机等定子和转子叶片的三维再制造成形。

随着新型材料研制和成形工艺监控技术提升,高速电弧喷涂再制造成形技术已成为可以实现大厚度再制造成形的一项技术,已由原来主要用于表面涂层制备,发展到具备厚成形能力的水平,这得益于电弧喷涂成形理论、材料和技术工艺方法方面研究的突破。

2) 自动化、智能化再制造成形技术

再制造成形技术方法已由最初重视废旧零件尺寸和性能恢复的成形技术手段的研究,正在朝提高再制造成形效率的自动化再制造成形方向发展。其中,一个重要突破是把三维反求建模技术和再制造工艺相结合,实现再制造成形技术的自动化过程。

大连海事大学、华中科技大学等单位针对再制造成形过程中的零件缺损部位的反求建模,在理论和技术研究方面取得了突破性进展。

近年来,在机器人自动化再制造成形过程中的损伤部位再制造路径生成理论和方法以及自动化再制造成形设备系统构建等方面,均取得了较大研究进展。装甲兵工程学院系统开展了基于机器人的熔化极惰性气体保护(Metal Inert-gas, MIG)再制造成形技术研究,构建了再制造成形系统,并对缺损零件的非接触式三维扫描反求测量机制,各子系统标定方法和再制造成形建模方法、空间曲面分层方法、成形路径规划、再制造成形过程中的备件形变机理和形变规律及控形机制、装备备件再制造成形材料的集约化、面向轻质金属的再制造成形技术等