



“十二五”国家重点图书出版规划项目
21世纪先进制造技术丛书

自动化再制造基础与 关键技术

· 梁秀兵 陈永雄 胡振峰 蔡志海 乔玉林 著 ·



科学出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目

21 世纪先进制造技术丛书

自动化再制造基础与关键技术

梁秀兵 陈永雄 胡振峰 蔡志海 乔玉林 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

《中国制造 2025》中指出,要全面推行绿色制造,大力发展再制造产业,实施高端再制造、智能再制造、在役再制造,推进产品认定,促进再制造产业持续健康发展。本书结合作者多年来的研究工作,介绍了再制造工程的发展历程及智能再制造工程的基本理论体系,总结了高速电弧喷涂、纳米电刷镀、激光熔覆、激光清洗等再制造关键技术的最新研究成果。

本书可供从事制造及相关行业的工程技术人员及生产管理人员阅读,也可供高等院校及科研院所开展再制造研究或教学的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

自动化再制造基础与关键技术 / 梁秀兵等著. —北京:科学出版社,2019.9
(21 世纪先进制造技术丛书)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-03-061461-2

I. ①自… II. ①梁… III. ①制造业-自动化技术 IV. ①T

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 108815 号

责任编辑:刘宝莉 乔丽维 / 责任校对:郭瑞芝

责任印制:师艳茹 / 封面设计:陈 敬

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019 年 9 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2019 年 9 月第一次印刷 印张:13

字数:260 000

定价:120.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《21 世纪先进制造技术丛书》编委会

主 编 熊有伦(华中科技大学)

编 委 (按姓氏笔画排序)

丁 汉(华中科技大学)

王 煜(香港中文大学)

王田苗(北京航空航天大学)

王立鼎(大连理工大学)

王国彪(国家自然科学基金委员会)

王越超(中国科学院理化技术研究所)

冯 刚(香港城市大学)

冯培恩(浙江大学)

任露泉(吉林大学)

刘洪海(朴次茅斯大学)

江平宇(西安交通大学)

孙立宁(哈尔滨工业大学)

李泽湘(香港科技大学)

李涤尘(西安交通大学)

李涵雄(香港城市大学/中南大学)

宋玉泉(吉林大学)

张玉茹(北京航空航天大学)

张宪民(华南理工大学)

周仲荣(西南交通大学)

赵淳生(南京航空航天大学)

查建中(北京交通大学)

柳百成(清华大学)

钟志华(同济大学)

顾佩华(汕头大学)

徐滨士(陆军装甲兵学院)

黄 田(天津大学)

黄 真(燕山大学)

黄 强(北京理工大学)

管晓宏(西安交通大学)

雒建斌(清华大学)

谭 民(中国科学院自动化研究所)

谭建荣(浙江大学)

熊蔡华(华中科技大学)

翟婉明(西南交通大学)

《21 世纪先进制造技术丛书》序

21 世纪,先进制造技术呈现出精微化、数字化、信息化、智能化和网络化的显著特点,同时也代表了技术科学综合交叉融合的发展趋势。高技术领域如光电子、纳电子、机器视觉、控制理论、生物医学、航空航天等学科的发展,为先进制造技术提供了更多更好的新理论、新方法和新技术,出现了微纳制造、生物制造和电子制造等先进制造新领域。随着制造学科与信息科学、生命科学、材料科学、管理科学、纳米科技的交叉融合,产生了仿生机械学、纳米摩擦学、制造信息学、制造管理学等新兴交叉科学。21 世纪地球资源和环境面临空前的严峻挑战,要求制造技术比以往任何时候都更重视环境保护、节能减排、循环制造和可持续发展,激发了产品的安全性和绿色度、产品的可拆卸性和再利用、机电装备的再制造等基础研究的开展。

《21 世纪先进制造技术丛书》旨在展示先进制造领域的最新研究成果,促进多学科多领域的交叉融合,推动国际学术交流与合作,提升制造学科的学术水平。我们相信,有广大先进制造领域的专家、学者的积极参与和大力支持,以及编委们的共同努力,本丛书将为发展制造科学,推广先进制造技术,增强企业创新能力做出应有的贡献。

先进机器人和先进制造技术一样是多学科交叉融合的产物,在制造业中的应用范围很广,从喷漆、焊接到装配、抛光和修理,成为重要的先进制造装备。机器人操作是将机器人本体及其作业任务整合为一体的学科,已成为智能机器人和智能制造研究的焦点之一,并在机械装配、多指抓取、协调操作和工件夹持等方面取得显著进展,因此,本系列丛书也包含先进机器人的有关著作。

最后,我们衷心地感谢所有关心本丛书并为丛书出版尽力的专家们,感谢科学出版社及有关学术机构的大力支持和资助,感谢广大读者对丛书的厚爱。

熊有伦

华中科技大学

2008年4月

前 言

当今社会,经济高速发展带来的资源、环境和气候变化问题十分突出。工业化、城镇化进程一方面推动了经济发展和社会进步,另一方面加剧了资源环境约束等问题。保护地球环境、构建循环经济、保持社会经济可持续发展已成为世界各国共同关注的话题。绿色制造和循环经济是人类社会可持续发展的基础,是制造业未来的发展方向。我国在 2015 年提出并实施“中国制造 2025”,坚持创新驱动、智能转型、强化基础、绿色发展,加快从制造大国转向制造强国;全面推行绿色制造,大力发展再制造产业,实施高端再制造、智能再制造、在役再制造,推进产品认定,促进再制造产业持续健康发展。我国再制造行业经过几十年的发展已进入产业化发展阶段,在技术方面和管理方面也已取得积极成果,下一步发展智能再制造不仅能够顺应中国制造业的发展趋势,还能够进一步提高再制造的产业效益及效率。因此,大力发展再制造理论和关键技术,对推动我国再制造产业发展意义重大。

纵观再制造工程领域的相关理论文献,尚缺少关于再制造工程理论方面的系统介绍,目前大多数从事再制造行业的企业和研究单位也深感再制造关键技术及其最新理论的缺乏,这在一定程度上限制了机电产品再制造行业的发展。因此,本书结合作者团队多年来在再制造工程理论及关键技术领域的研究工作,对最新的研究成果进行了总结。全书共 5 章。第 1 章主要介绍再制造的内涵、发展历程及智能再制造工程技术体系,以便读者清晰地认识再制造行业的历史背景和地位,以及未来再制造的发展重点;第 2 章主要介绍电弧喷涂再制造技术,同时也总结电弧喷涂技术应用于汽车零部件再制造产业的典型案例;第 3 章主要介绍自动化纳米电刷镀技术的工艺特点、自动化设备系统与工艺组成,以及典型再制造应用案例;第 4 章主要介绍激光熔覆再制造技术的基本工艺特点,并详细总结激光熔覆非晶复合涂层的最新研究结果;第 5 章主要介绍激光清洗这一新兴再制造表面预处理技术,重点总结自动化激光清洗设备、去除机理及应用效果等方面的技术内容。本书的编写兼顾理论性和工程实用性。通过阅读本书,读者可对

再制造基础理论有一个基本的理解,同时也可对再制造所涉及的几类成形加工关键技术有一个最新的认识。

本书由梁秀兵、陈永雄、胡振峰、蔡志海、乔玉林等统稿。第1章由梁秀兵、史佩京、李恩重、刘渤海、杜晓坤、姚巨坤、徐滨士撰写;第2章由陈永雄、梁秀兵、商俊超、张志彬、涂龙撰写;第3章由胡振峰、王浩旭、胡海韵、董世运撰写;第4章由蔡志海、孙博、柳建、刘军、白旭东、罗晓亮撰写;第5章由乔玉林、刘照围、王思捷、梁秀兵撰写。

本书的顺利出版得益于北京市科技计划项目“发动机高附加值零部件再制造设备成果转化”(Z131100006413031)、国家自然科学基金项目“低温微粒轰击与热喷涂一体化成形技术及涂层性能强化机理”(51575527),以及军队科研项目等的资助,在此表示衷心感谢。同时,向为本书提供素材的陆军装甲兵学院装备再制造技术国防科技重点实验室、机械产品再制造国家工程研究中心等单位表示衷心感谢。

限于作者水平,书中难免存在不足之处,恳请读者指正并提出宝贵意见。

目 录

《21 世纪先进制造技术丛书》序

前言

第 1 章 再制造工程发展与技术体系	1
1.1 再制造内涵	1
1.1.1 再制造工程内涵	1
1.1.2 我国再制造工程发展历程	1
1.1.3 再制造工艺流程	4
1.1.4 再制造工程发展的重要意义	4
1.2 再制造技术	6
1.2.1 再制造拆解技术	6
1.2.2 再制造清洗技术	8
1.2.3 再制造检测技术	17
1.2.4 再制造快速成形技术	19
1.3 智能再制造工程	21
1.3.1 智能再制造工程体系结构	21
1.3.2 智能再制造工程体系组成	22
1.3.3 智能再制造工程体系发展	28
1.4 再制造工程发展趋势	29
参考文献	31
第 2 章 电弧喷涂再制造技术	33
2.1 电弧喷涂原理及特点	33
2.2 电弧喷涂工艺	35
2.2.1 表面预处理	35

2.2.2	涂层质量控制	36
2.2.3	电弧喷涂后处理	39
2.3	高速燃气-电弧复合喷涂	40
2.3.1	高速燃气-电弧复合喷涂用煤油雾化喷嘴	41
2.3.2	高速燃气喷涂枪油气控制系统	56
2.3.3	煤油雾化的高速摄像试验	57
2.3.4	高速燃气-电弧复合喷涂枪的总体设计与试验	58
2.3.5	机器人自动化系统	60
2.3.6	电弧喷涂逆变电源	61
2.3.7	高速燃气-电弧复合喷涂 3Cr13 不锈钢涂层	63
2.4	电弧喷涂再制造应用实例	66
2.4.1	再制造发动机缸体工艺方案	66
2.4.2	电弧喷涂涂层表面温度监测试验	70
2.4.3	涂层结构性能分析	72
2.4.4	再制造应用效果分析	77
	参考文献	78
第3章	自动化纳米电刷镀技术	80
3.1	纳米电刷镀技术	80
3.1.1	电刷镀原理	80
3.1.2	电刷镀主要特点	81
3.1.3	纳米电刷镀原理及特点	82
3.2	纳米电刷镀工艺	83
3.3	自动化电刷镀系统	85
3.3.1	自动化电刷镀系统总体结构	85
3.3.2	自动化电刷镀基础镀液的成分设计及优化	88
3.3.3	自动化电刷镀系统装夹密封装置	90
3.3.4	自动化电刷镀笔	91

3.3.5 自动化内孔电刷镀设备	97
3.4 自动化电刷镀工艺参数优化设计	99
3.4.1 电刷镀笔转速对镀层性能的影响	100
3.4.2 电流密度对镀层性能的影响	103
3.5 自动化内孔电刷镀应用实例	108
3.5.1 内孔电刷镀工艺设计	109
3.5.2 内孔电刷镀工艺改进	110
3.5.3 自动化内孔电刷镀装置设计方案	112
3.5.4 自动化内孔电刷镀设备	113
3.5.5 再制造连杆效益分析	114
参考文献	116
第4章 激光熔覆再制造技术	117
4.1 激光熔覆技术	117
4.1.1 激光熔覆技术原理	118
4.1.2 激光熔覆技术主要特点	119
4.2 激光熔覆工艺	120
4.2.1 激光熔覆激光器	120
4.2.2 激光熔覆工艺参数	123
4.3 自动化激光熔覆	124
4.3.1 自动化激光熔覆特点	125
4.3.2 自动化激光熔覆工艺	126
4.4 激光熔覆 FeCrMoCBY 合金熔覆层	126
4.4.1 试验材料及方法	127
4.4.2 FeCrMoCBY 合金熔覆层	128
4.5 激光熔覆 FeBSiNb 合金熔覆层	136
4.5.1 试验材料及方法	137
4.5.2 FeBSiNb 合金熔覆层	137

4.6 激光熔覆 FeCoNiBSiNb 合金熔覆层	159
4.6.1 试验材料及方法	159
4.6.2 FeCoNiBSiNb 合金熔覆层	160
参考文献	168
第5章 自动化激光清洗技术	170
5.1 激光清洗特征及机理	170
5.1.1 激光清洗特征	171
5.1.2 激光清洗机理	171
5.2 自动化激光清洗设备	173
5.3 激光清洗漆层	174
5.3.1 激光峰值功率密度对除漆效率的影响	174
5.3.2 水膜对激光除漆效率的影响	175
5.3.3 激光除漆对基材力学性能的影响	176
5.3.4 激光清洗表面分析	177
5.4 激光清洗表面锈蚀	180
5.4.1 工艺参数对激光清洗锈蚀表面清洗效果的影响	180
5.4.2 工艺参数对激光清洗锈蚀表面粗糙度的影响	183
5.4.3 工艺参数对激光清洗锈蚀表面硬度的影响	185
5.4.4 激光清洗锈蚀后的表面分析	185
5.5 钛合金表面的激光清洗	187
5.5.1 钛合金表面积炭激光清洗阈值	187
5.5.2 钛合金表面激光清洗表面形貌与元素分析	190
参考文献	192

第1章 再制造工程发展与技术体系

地球资源的日益枯竭和居住环境的日益恶化迫使人类需要改变以往粗放、掠夺式的发展模式,以实现人类社会的和谐、可持续发展。将大量的废旧装备集中起来,以拆解后的废旧零部件作为毛坯,利用表面工程技术对毛坯进行批量化修复和升级改造,赋予废旧装备再次服役的能力,这一过程就是再制造。进一步讲,再制造工程是以产品的“后半生”为研究对象,提升、改造废旧产品的性能,使废旧产品重获生命力,使其蕴含的价值得到最大限度的开发和利用,从而缓解资源短缺与浪费的矛盾,减少大量失效、报废产品对环境的危害。因此,再制造工程是一个资源潜力巨大、经济效益显著、环保作用突出、符合全球可持续发展的绿色工程。

1.1 再制造内涵

再制造作为一种变革传统生产方式和生活方式的社会经济活动,在节能节材、保护环境和可持续发展等方面都具有重要意义。从长远来看,再制造工程是人类生存和发展的必然选择,深刻理解再制造工程的内涵、发展及其特点也很有必要。

1.1.1 再制造工程内涵

再制造工程是以机电产品全寿命周期设计和管理为指导,以实现产品性能跨越式提升为目标,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,对废旧机电产品进行修复和改造的一系列技术措施或工程活动的总称^[1],也可以理解为再制造工程就是废旧机电产品高质量维修技术的产业化。

1.1.2 我国再制造工程发展历程

我国再制造工程的发展大体经历了产业萌生、科学论证和政府推进三

个主要阶段^[2]。

1. 产业萌生阶段

20 世纪 90 年代初期,济南复强动力有限公司、上海大众汽车有限公司(再制造分厂)、柏科(常熟)电机有限公司和广州市花都全球自动变速箱有限公司相继成立,分别从事汽车发动机、发电机、电动机、自动变速箱的再制造工作,均按国外再制造技术标准生产,产品质量可靠,产量稳步增加。90 年代中期,国内汽车非法拼装盛行,严重扰乱了市场秩序并造成极大的安全隐患。2001 年,国务院令第 307 号《报废汽车回收管理办法》要求坚决取缔汽车非法拼装市场,并规定废旧汽车的发动机、方向机、变速器、前后桥、车架等几大总成部分一律只许回炉炼钢,不能再进入市场流通使用,这就中断了上述再制造企业的加工毛坯来源,导致这些再制造企业产量严重下滑,生存处境艰难。

2. 科学论证阶段

1999 年 6 月,徐滨士在西安召开的先进制造技术国际会议上首次提出了再制造的概念;同年 12 月,在广州召开的国家自然科学基金委员会机械工程科学前沿及优先领域研讨会上,徐滨士应邀作了题为《现代制造科学之 21 世纪的再制造工程技术及理论研究》的报告,国家自然科学基金委员会批准将“再制造工程技术及理论研究”列为国家自然科学基金机械学科优先发展领域。2000 年 3 月,徐滨士在瑞典哥德堡召开的第 15 届欧洲维修国际会议上发表了题为《面向 21 世纪的再制造工程》的会议论文,这是我国学者在国际维修学术会议上首次发表“再制造”方面的论文。2001 年 5 月,国防科学技术工业委员会和解放军总装备部批准立项建设我国首个再制造领域的国家级重点实验室——装备再制造技术国防科技重点实验室。该实验室自成立以来,在构建再制造工程理论体系、攻克再制造毛坯剩余寿命评估难题、研发再制造关键技术以及支持再制造企业技术创新等方面取得一批可喜成果。2003 年 12 月由徐滨士领衔撰写、20 位工程院院士审签的中国工程院咨询报告《废旧机电产品资源化》上报国务院研究。2004 年 9 月,国家发展和改革委员会组织召开了“全国循环经济工作会”,徐滨士应邀到会作了《发展再制造工程,促进构建循环经济》的专题报告。2006 年,中国工程

院的“建设节约型社会战略咨询研究”咨询项目研究报告中再次把“机电产品回收利用与再制造工程”列为建设节约型社会 17 项重点工程之一。上述学术研究和多方位论证为我国再制造工程的发展及政府决策奠定了科学基础。

3. 政府推进阶段

2005 年国务院颁发的 21 号、22 号文件均明确指出,国家支持废旧机电产品再制造,并组织相关绿色再制造技术及其创新能力的研发。同年 11 月,国家发展和改革委员会等六部委联合颁布了《关于组织开展循环经济试点(第一批)工作的通知》,其中再制造工程被列为四个重点领域之一,我国发动机再制造企业——济南复强动力有限公司被列为再制造重点领域中的试点单位。2006 年,国务院开始组织以汽车零部件为再制造产业试点,探索经验,研发技术,并开始考虑适时修订有关法律法规。2007 年,装备再制造技术国防科技重点实验室承担的“机电产品可持续性设计与复合再制造的基础研究”再次被国家自然科学基金委员会批准为重点项目。2008 年,国家发展和改革委员会组织了“全国汽车零部件再制造产业试点实施方案评审会”,共批准 14 家汽车零部件再制造企业开展试点。2009 年 1 月 1 日全国人大常委会通过的《中华人民共和国循环经济促进法》开始实施。该法律为推进再制造产业发展提供了法律依据,并规范了对再制造产业的管理。

为贯彻落实《中国制造 2025》、《工业绿色发展规划(2016—2020 年)》、《绿色制造工程实施指南(2016—2020 年)》,加快发展高端再制造和智能再制造,进一步提升机电产品再制造技术管理水平和产业发展质量,推动形成绿色发展方式,以实现绿色增长。工业和信息化部于 2017 年 11 月发布了《高端智能再制造行动计划(2018—2020 年)》,计划到 2020 年,突破一批制约我国高端智能再制造发展的拆解、检测、成形加工等关键共性技术,智能检测、成形加工技术达到国际先进水平;发布 50 项高端智能再制造管理、技术、装备及评价等标准;初步建立可复制推广的再制造产品应用市场化机制;推动建立 100 个高端智能再制造示范企业、技术研发中心、服务企业、信息服务平台、产业集聚区等,带动我国再制造产业规模达到 2000 亿元。

当前国家对发展再制造产业高度重视,鼓励政策和法律法规将相继出台,再制造示范试点工作稳步进行,再制造理论与技术的研究已取得重要成果。我国已进入以国家目标推动再制造产业发展为中心内容的新阶段,国内再制造的发展呈现出良好态势。

1.1.3 再制造工艺流程

再制造对象广泛,既可以是设备、系统、设施,也可以是零部件,既包括硬件也包括各种再制造控制软件。硬件再制造的工艺流程一般包括拆解、清洗、检测、加工、零部件测试、装配、整机磨合试验、喷漆包装等步骤。由于再制造的产品种类、生产目的、生产组织形式不同,不同产品的再制造工艺有所区别,但主要过程类似,如图 1.1 所示。

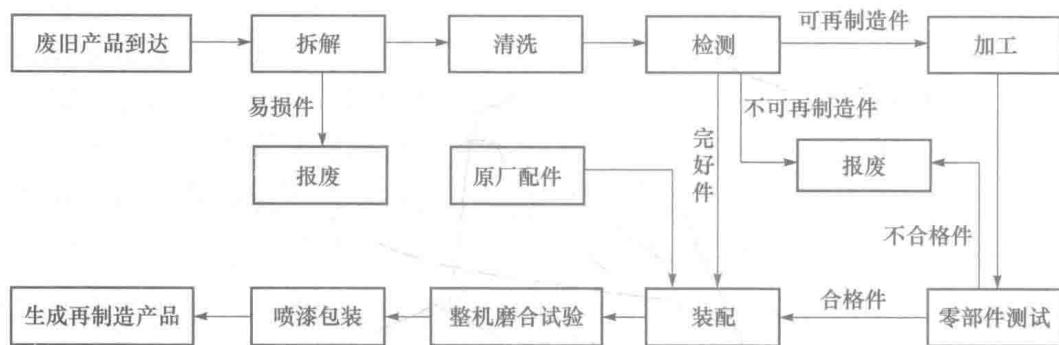


图 1.1 再制造工艺流程图

再制造工艺过程的每个步骤相互联系,而且每个步骤包含的信息流都是掌握不同类型产品再制造特点的信息支撑。例如,通过清洗后,检测统计到某类零件损坏率较高,且其再制造价值比较小,则在再制造中可以停止对该类零件的清洗,直接做报废处理。而且在拆解过程中如果需要,也可以对该类零件进行破坏性拆解,以实现废旧装备的顺利拆解。如果检测统计到组成某部件的所有零件尺寸和性能完好,则在再制造中可以省去对该类部件的拆解工作,以节省再制造工作量,提高再制造效率。

1.1.4 再制造工程发展的重要意义

再制造工程以废旧机电产品为对象,可以实现变废为宝,化害为利,减

少自然资源的消耗和废物的排放,是循环经济的重要组成部分。发展再制造工程对我国循环经济的发展,实现可持续发展战略目标具有重要意义,主要体现在以下五个方面。

1) 发展再制造工程可以减少对原生资源的依赖和利用

城市生产生活所产生的所有废物,如报废汽车、报废机床、废旧家电等,经过处理都可以变成钢铁、有色金属及塑料等生活所需产品制造的原材料。这些废弃物被誉为城市矿山。据统计,从1t废旧手机中可以提炼400g金、2300g银和172g铜;从1t废旧个人计算机中可以提炼300g金、1000g银、150g铜和近2000g稀有金属等。一台废旧斯太尔发动机中,94.5%的零件(质量分数)都可以再利用和再制造。同时,从城市矿山中提炼金、银、铜、铁、铝及各种稀缺资源的成本要比直接从矿山中开采降低85%左右。城市矿山为我们提供了另一种矿产资源的储存方式。充分挖掘城市矿山资源潜力进行再制造,可以有效减少对原生资源的开采和依赖,减轻我国人均资源匮乏的压力,对实现我国的可持续发展具有重要意义。

2) 再制造工程经济效益显著

再制造工程提高了产品的利润空间。相关资料表明,20世纪90年代末,美国施乐复印机再制造每年的收益就可以达到约25亿美元,汽车再制造产业年销售额约为365亿美元,占全部再制造业的68%^[3]。2002年,美国再制造产业的年产值占GDP的0.4%。保守计算,如果以美国2002年的再制造产业水平作为我国2020年的发展目标,则到2020年我国再制造产业年产值将达到680亿美元。

3) 再制造工程环保效益突出

1998年,《中国环境污染状况备忘录》中指出,造成全球环境污染的排放物有70%以上来自制造业,其每年约产生55亿t无害废物和7亿t有害废物。再制造工程使大量的废旧产品变废为宝,不但可以减少原始资源的开采和利用,也可以减少掩埋土地使用量和直接掩埋对环境造成的污染,极大地节约能源,环保作用突出。以复印机再制造为例,1个硒鼓一般有1362g塑料,做掩埋处理需要一百多年才能使塑料降解,2001年美国再制造的硒鼓数量约为200万个,减少了2724t的掩埋量。相关资料表明,每再制造利用1t铜,不但可以大量减少固体有害废物的产生,而且可