



国家出版基金资助项目 / “十三五”国家重点出版物

绿色再制造工程著作

总主编 徐滨士

再制造零件与产品的 疲劳寿命评估技术

FATIGUE LIFE ASSESSMENT
TECHNIQUE FOR
REMANUFACTURED
PARTS AND PRODUCT

王海斗 邢志国 董丽虹 著

哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



国家出版基金资助项目 / “十三五”国家重点出版物
绿色再制造工程著作

总主编 徐滨士

再制造零件与产品的 疲劳寿命评估技术

FATIGUE LIFE ASSESSMENT
TECHNIQUE FOR
REMANUFACTURED
PARTS AND PRODUCT

王海斗 邢志国 董丽虹 著

哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内容简介

再制造工程是新兴产业,再制造产品质量直接影响再制造企业的效益,决定着再制造企业的发展状况,更关系到再制造产业能否健康发展。本书内容主要包括再制造工程及疲劳寿命评估研究、再制造涂层接触疲劳寿命评估研究、再制造涂层接触疲劳/磨损竞争性寿命评估研究、再制造涂层弯曲疲劳寿命评估研究、再制造熔覆层疲劳寿命评估研究、再制造薄膜疲劳寿命评估研究及再制造零件及其产品寿命演变的无损检测技术。

本书可供再制造领域的科研人员、技术人员、企业管理人员尤其是大型结构件疲劳寿命测试技术人员参考使用,也可供高等院校及科研院所相关教学及研究设计人员阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

再制造零件与产品的疲劳寿命评估技术/王海斗,邢志国,董丽虹著. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2019. 6

绿色再制造工程著作

ISBN 978-7-5603-8150-3

I. ①再… II. ①王… ②邢… ③董… III. ①工业产品—疲劳寿命估算 IV. ①TB302.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 073428 号



策划编辑 许雅莹 张秀华 杨 桦
责任编辑 刘 瑶 王 玲 那兰兰 王晓丹
封面设计 卞秉利
出版发行 哈尔滨工业大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006
传 真 0451-86414749
网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>
印 刷 哈尔滨市石桥印务有限公司
开 本 660mm×980mm 1/16 印张 25.25 字数 450 千字
版 次 2019 年 6 月第 1 版 2019 年 6 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5603-8150-3
定 价 128.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

《绿色再制造工程著作》

编 委 会

主 任 徐滨士

副主任 刘世参 董世运

委 员 (按姓氏音序排列)

陈 茜	董丽虹	郭 伟	胡振峰
李福泉	梁 义	刘渤海	刘玉欣
卢松涛	吕耀辉	秦 伟	史佩京
王海斗	王玉江	魏世丞	吴晓宏
邢志国	闫世兴	姚巨坤	于鹤龙
张 伟	郑汉东	朱 胜	

《绿色再制造工程著作》

丛 书 目

- | | |
|-----------------------|---------|
| 1. 绿色再制造工程导论 | 徐滨士 等编著 |
| 2. 再制造设计基础 | 朱 胜 等著 |
| 3. 装备再制造拆解与清洗技术 | 张 伟 等编著 |
| 4. 再制造零件无损评价技术及应用 | 董丽虹 等编著 |
| 5. 纳米颗粒复合电刷镀技术及应用 | 徐滨士 等著 |
| 6. 热喷涂技术及其在再制造中的应用 | 魏世丞 等编著 |
| 7. 轻质合金表面功能化技术及应用 | 吴晓宏 等著 |
| 8. 等离子弧熔覆再制造技术及应用 | 吕耀辉 等编著 |
| 9. 激光增材再制造技术 | 董世运 等编著 |
| 10. 再制造零件与产品的疲劳寿命评估技术 | 王海斗 等著 |
| 11. 再制造效益分析理论与方法 | 徐滨士 等编著 |
| 12. 再制造工程管理与实践 | 徐滨士 等编著 |

序 言

推进绿色发展,保护生态环境,事关经济社会的可持续发展,事关国家的长治久安。习近平总书记提出“创新、协调、绿色、开放、共享”五大发展理念,党的十八大报告也明确了中国特色社会主义事业的“五位一体”的总体布局,强调“把生态文明建设放在突出地位,融入经济建设、政治建设、文化建设、社会建设各方面和全过程,努力建设美丽中国,实现中华民族永续发展”,并将绿色发展阐述为关系我国发展全局的重要理念。党的十九大报告继续强调推进绿色发展、牢固树立社会主义生态文明观。建设生态文明是关系人民福祉、关乎民族未来的大计,生态环境保护是功在当代、利在千秋的事业。推进生态文明建设是解决新时代我国社会主要矛盾的重要战略突破,是把我国建设成社会主义现代化强国的需要。发展再制造产业正是促进制造业绿色发展、建设生态文明的有效途径,而《绿色再制造工程著作》丛书正是树立和践行绿色发展理念、切实推进绿色发展的思想自觉和行动自觉。

再制造是制造产业链的延伸,也是先进制造和绿色制造的重要组成部分。国家标准《再制造 术语》(GB/T 28619—2012)对“再制造”的定义为:“对再制造毛坯进行专业化修复或升级改造,使其质量特性(包括产品功能、技术性能、绿色性、经济性等)不低于原型新品水平的过程。”并且再制造产品的成本仅是新品的50%左右,可实现节能60%、节材70%、污染物排放量降低80%,经济效益、社会效益和生态效益显著。

我国的再制造工程是在维修工程、表面工程基础上发展起来的,采取了不同于欧美的以“尺寸恢复和性能提升”为主要特征的再制造模式,大量应用了零件寿命评估、表面工程、增材制造等先进技术,使旧件尺寸精度恢复到原设计要求,并提升其质量和性能,同时还可以大幅度提高旧件的再制造率。

我国的再制造产业经过将近20年的发展,历经了产业萌生、科学论证和政府推进三个阶段,取得了一系列成绩。其持续稳定的发展,离不开国

家政策的支撑与法律法规的有效规范。我国再制造政策、法律法规经历了一个从无到有、不断完善、不断优化的过程。《循环经济促进法》《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十三个五年规划的建议》《战略性新兴产业重点产品和服务指导目录(2016版)》《关于加快推进生态文明建设的意见》和《高端智能再制造行动计划(2018—2020年)》等明确提出支持再制造产业的发展,再制造被列入国家“十三五”战略性新兴产业,《中国制造2025》也提出:“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。”

再制造作为战略性新兴产业,已成为国家发展循环经济、建设生态文明社会的最有活力的技术途径,从事再制造工程与理论研究的科技人员队伍不断壮大,再制造企业数量不断增多,再制造理念和技术成果已推广应用到国民经济和国防建设各个领域。同时,再制造工程已成为重要的学科方向,国内一些高校已开始招收再制造工程专业的本科生和研究生,培养的年轻人才和从业人员数量增长迅速。但是,再制造工程作为新兴学科和产业领域,国内外均缺乏系统的关于再制造工程的著作丛书。

我们清楚编撰再制造工程著作丛书的重大意义,也感到应为国家再制造产业发展和人才培养承担一份责任,适逢哈尔滨工业大学出版社的邀请,我们组织科研团队成员及国内一些年轻学者共同撰写了《绿色再制造工程著作》丛书。丛书的撰写,一方面可以系统梳理和总结团队多年来在绿色再制造工程领域的研究成果,同时进一步深入学习和吸纳相关领域的知识与新成果,为我们的进一步发展夯实基础;另一方面,希望能够吸引更多的人更系统地了解再制造,为学科人才培养和领域从业人员业务水平的提高做出贡献。

本丛书由12部著作组成,综合考虑了再制造工程学科体系构成、再制造生产流程和再制造产业发展的需要。各著作内容主要是基于作者及其团队多年来取得的科研与教学成果。在丛书构架等方面,力求体现丛书内容的系统性、基础性、创新性、前沿性和实用性,涵盖了绿色再制造生产流程中的绿色清洗、无损检测评价、再制造工程设计、再制造成形技术、再制造零件与产品的寿命评估、再制造工程管理以及再制造经济效益分析等方面。

在丛书撰写过程中,我们注意突出以下几方面的特色:

1. 紧密结合国家循环经济、生态文明和制造强国等国家战略和发展规划,系统归纳、总结和提炼绿色再制造工程的理论、技术、工程实践等方面

的研究成果,同时突出重点,体现丛书整体内容的体系完整性及各著作的相对独立性。

2. 注重内容的先进性和新颖性。丛书内容主要基于作者完成的国家、部委、企业等的科研项目,且其成果已获得多项国家级科技成果奖和部委级科技成果奖,所以著作内容先进,其中多部著作填补领域空白,例如《纳米颗粒复合电刷镀技术及应用》《再制造零件与产品的疲劳寿命评估技术》和《再制造工程管理与实践》等。同时,各著作兼顾了再制造工程领域国内外的最新研究进展和成果。

3. 体现以下几方面的“融合”:(1)再制造与环境保护、生态文明建设相融合,力求突出再制造工艺流程和关键技术的“绿色”特性;(2)再制造与先进制造相融合,力求从再制造基础理论、关键技术和应用实现等多方面系统阐述再制造技术及其产品性能和效益的优越性;(3)再制造与现代服务相融合,力求体现再制造物流、再制造标准、再制造效益等现代装备服务业及装备后市场特色。

在此,感谢国家发展改革委、科技部、工信部等国家部委和中国工程院、国家自然科学基金委员会及国内多家企业在科研项目方面的大力支持,这些科研成果构成了丛书的主体内容,也正是基于这些项目成果,我们才能够撰写本丛书。同时,感谢国家出版基金管理委员会对本丛书出版的大力支持。

本丛书适于再制造领域的科研人员、技术人员、企业管理人员参考,也可供政府相关部门领导参阅;同时,本丛书可以作为材料科学与工程、机械工程、装备维修等相关专业的研究生和高年级本科生的教材。

中国工程院院士



2019年5月18日

前 言

再制造是对废旧装备进行修复与提升的先进逆向制造过程。它是制造产业链的延伸,也是先进制造和绿色制造的重要组成部分。

再制造需要回答的重要问题之一就是“再制造后怎样”,即已完成再制造的产品(称为再制造产品)是否可以在新一轮服役周期中安全服役。疲劳寿命评估技术是评判“再制造后怎样”的核心手段,特别是疲劳寿命演变属于非线性变化,其规律尚未被掌握,因此突破再制造产品疲劳寿命评估就成为回答“再制造后怎样”的最关键因素。

再制造产品疲劳寿命评估难就难在不仅要评估涂覆层的疲劳寿命变化,还要评估基体的疲劳寿命变化。一方面,废旧件(即再制造毛坯)是具有过往服役历史且无法量化追寻的已成型零件,存在着较多的隐性损伤及微裂纹,增材再制造后并不能消除它们,新一轮服役中的交变载荷就可能在这些缺陷处诱发疲劳失效;另一方面,完成了再制造零件的局部逆向增材形成的涂覆层,存在大量宏/微观交界面和修复成形过程引入的原生性缺陷,这些缺陷同样会成为新一轮服役中的裂纹源。上述极端问题,导致再制造产品的疲劳寿命评估成为当前国际学术界尚未解决的重大难题。

本书深入阐释了对再制造零件与产品寿命评估理论与技术的认识与理解,系统地梳理了作者十余年来所承担的相关科研项目的研究成果,包括再制造毛坯(曲轴)隐性损伤评估技术、再制造涂层的接触疲劳寿命评估技术、接触疲劳/磨损竞争性寿命评估技术、弯曲疲劳寿命评估技术、再制造熔覆层/薄膜的高周疲劳及超高周疲劳寿命评估技术以及再制造零件与产品寿命演变的无损检测技术等系列评估技术。希望通过本书向广大读者全面介绍再制造零件与产品的疲劳寿命评估技术,帮助本领域的专家、学者与工程技术人员了解相关技术,并在维修与再制造及机械加工制造中合理地进行选择和运用,更好地从事再制造生产实践,助力再制造产业的健康快速发展。

本书内容属于应用基础研究,作者在撰写过程中参考了大量的国内外文献,在此谨向相关作者表示深切的谢意。

作者研究团队成员有底月兰、马国政、刘明、郭伟玲、王鑫、周新远、黄艳斐、何东昱、郭伟、米庆博、张玉波、宋亚南、王志远、李彩云、周仁泽、王雷、周雳、张洁、李琳、王霞、邵泉、李继明、周进驰、何鹏飞、丁述宇等,他们为本书的撰写提供了很大帮助,在此一并表示感谢。

我们得到了中国地质大学康嘉杰教授和朱丽娜教授、哈尔滨工程大学金国教授、浙江工业大学朴钟宇副教授、中国航发北京航空材料研究院田浩亮研究员、哈尔滨工程大学刘金娜博士等的大力支持和帮助,对此,我们全体编写人员向他们表示诚挚的感谢。

本书介绍的研究得到了国家自然科学基金重点项目“再制造产品性能调控中的基础科学问题”(51535011)、国家自然科学基金面上项目“重载齿轮损伤原位监测涂层协同变形机制及使役机理”(51775554)等的支持,在此表示衷心的感谢。

再制造产品寿命评估的研究工作任重道远,作者仍在不断提升对这一难题的认识高度与深度。由衷地希望广大专家和读者对本书提出宝贵意见和建议。

作 者

2019 年 3 月

目 录

第 1 章 再制造工程与疲劳寿命评估研究	1
1.1 再制造工程概述	1
1.2 再制造先进技术	7
1.3 再制造零件与产品疲劳失效分析中的无损检测技术	20
1.4 再制造零件与产品疲劳寿命评估的研究现状	40
本章参考文献	56
第 2 章 再制造涂层接触疲劳寿命评估研究	70
2.1 接触疲劳试验机	70
2.2 接触应力作用下涂层内部应力分析状态模拟	72
2.3 涂层完整性对再制造涂层接触疲劳行为的影响研究	73
2.4 负载条件对再制造涂层接触疲劳行为的影响研究	109
本章参考文献	122
第 3 章 再制造涂层接触疲劳/磨损竞争性寿命评估研究	125
3.1 新型接触疲劳/磨损多功能试验机的研制	126
3.2 超音速等离子喷涂 AT40 涂层的竞争性寿命评估	137
3.3 超音速等离子喷涂 NiCr—Cr ₃ C ₂ 涂层的竞争性寿命评估	151
3.4 超音速等离子喷涂 NiCrBSi—30%Mo 涂层的竞争性寿命评估	158
3.5 热等静压 NiCr—Cr ₃ C ₂ 涂层的竞争性寿命评估	162
3.6 等离子喷涂 Cr ₂ O ₃ —TiO ₂ 涂层的竞争性寿命评估	169
本章参考文献	179
第 4 章 再制造涂层弯曲疲劳寿命评估研究	182
4.1 发动机曲轴高速电弧喷涂再制造工艺及热—力行为研究	182

4.2	轴类件表面沉积涂层的热力学模型建立	191
4.3	轴类件表面涂层的热-力映射关系研究	196
4.4	典型再制造零件与产品的疲劳寿命评估案例	203
	本章参考文献	218
第 5 章	再制造熔覆层疲劳寿命评估研究	219
5.1	再制造熔覆层的组织分析及性能表征	219
5.2	再制造熔覆试样的高周疲劳寿命评估研究	229
5.3	再制造熔覆试样超高周疲劳寿命评估研究	242
5.4	再制造压缩机叶轮构件寿命评估研究	256
	本章参考文献	277
第 6 章	再制造薄膜疲劳寿命评估研究	281
6.1	纳米尺度 MEMS 薄膜疲劳性能测试方法分析	281
6.2	再制造薄膜动态加载疲劳性能研究	288
6.3	再制造薄膜疲劳寿命评估模型	323
	本章参考文献	341
第 7 章	再制造零件与产品寿命演变的无损检测技术	343
7.1	声发射技术研究	343
7.2	红外检测技术研究	361
7.3	微电阻检测技术研究	368
7.4	磁记忆检测技术研究	374
	本章参考文献	385
	名词索引	387

第 1 章 再制造工程与疲劳寿命评估研究

1.1 再制造工程概述

1.1.1 再制造工程

20 世纪,人口、资源、环境的协调发展日益重要,如何在有限资源的基础之上实现效益最大化成为全人类的共同课题。废旧机电产品的处理是亟待解决的问题之一,简单的报废处理将造成极大的原材料浪费,同时也增加了环境的负担,消费了未来。在此背景之下,再制造应运而生,再制造利用机电产品各零部件寿命不同等特性,充分挖掘废旧机电产品中蕴含的附加值,起到节省资金、能源、材料和保护环境的作用。

国际上,再制造产业已有 50 多年的发展史,创造的经济效益和社会效益毋庸置疑。我国历来十分重视修旧利废,已提出在经济结构调整的同时,要从过去单纯追求规模、效益的模式转向 4R[Reduce(减量化)、Reuse(再利用)、Recycle(再循环)、Remanufacture(再制造)]的循环经济发展模式。在政府的大力推动和科研工作者的倾心投入下,具有中国特色的再制造产业已初具规模,并成功应用于汽车、工程机械、军用装备、海洋工程等诸多领域。再制造形成产品的寿命周期如图 1.1 所示。

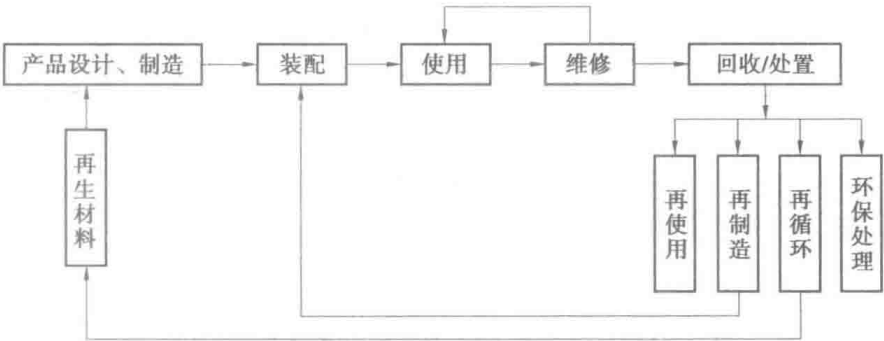


图 1.1 再制造形成产品的寿命周期

中国特色的再制造工程是以机电产品全寿命周期设计和管理为指导，

以废旧机电产品实现性能跨越式提升为目的,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。简单来说,再制造就是废旧机电产品高技术维修的产业化。再制造的重要特征是再制造产品的质量和性能不低于新品,成本仅是新品的50%,节能60%,节材70%,对环境的不良影响显著降低,可有力促进资源节约型、环境友好型社会的建设。

近年来,蓬勃发展的再制造工程就是充分挖掘废旧机电产品中所蕴含的“剩余价值”,以先进的再制造工程技术为支撑,通过科学的方案设计、严格的质量控制,恢复关键失效零部件的性能,达到废旧机电产品高效循环利用的目的。再制造的对象是广义的,既可以是设备、系统、设施,也可以是其关键零部件。再制造的过程就是采用一些较为成熟的表面工程技术,在报废零件的表面制备出性能优良的薄层以修复零件的表面损伤,使再制造产品的性能达到甚至超过新品。再制造工程具有极大的社会效益、经济效益、环境效益和军事效益。

1.1.2 再制造工程技术

再制造工程是新兴产业,再制造产品质量直接影响再制造企业的效益,决定再制造企业的生存,关系到再制造产业能否健康发展。自再制造工程创立以来,再制造产品的质量问题的质量一直受到行业内的高度关注。再制造工程的研究内容就是围绕如何实现再制造产品质量不低于新品这一核心命题展开的。根据决定再制造产品质量的关键因素,再制造工程的研究内容分为再制造质量评价技术和再制造成形加工关键技术。

目前,国外再制造以相对简单的尺寸修理法和换件修理法为主要手段,其弊端是旧件再制造率低、节能节材效果差、难以提升再制造产品的性能、加工量大、环保效果不佳等。相比之下,我国再制造的最大特点是将先进的表面工程技术引入了废旧产品的再制造,在最大限度保存旧件、降低能耗的基础上,通过合理的材料和功能设计实现了性能恢复乃至提升。可见,先进表面工程技术的引入赋予了再制造重要特征,那就是再制造产品的质量和性能不低于新品。

再制造质量评价技术包括再制造毛坯质量评价和再制造涂层质量评价两方面。在理论方面,再制造毛坯质量评价,需要研究零部件服役过程中性能的退化和破坏的失效规律,预测毛坯的剩余寿命,明确其是否具有再制造价值,确定再制造后的零部件能否支持下一个服役周期;再制造涂层质量评价,要求评估表面涂层以及涂层与基体的结合质量,预测再制造

后的服役寿命,保证再制造产品的性能不低于新品。在技术方面,再制造质量评价综合多种先进无损检测技术,建立以超声、涡流、金属磁记忆、声发射等先进无损检测技术为重要支撑,传统质量检测手段为辅助的再制造质量控制体系,检测废旧件的损伤程度以及裂纹类关键缺陷的真实状态和变化趋势,为预测再制造毛坯的剩余寿命和再制造涂层的服役寿命提供可靠依据。

再制造成形加工关键技术包括纳米电刷镀技术、高速电弧喷涂技术、激光熔覆技术、微束等离子快速成形技术、自修复技术等,其技术研究涉及再制造涂层材料、技术工艺及设备。在废旧零部件材质和形状基本不变的前提下,采用上述关键技术能恢复原产品的标准尺寸,使原产品的功能升级,保证再制造产品质量不低于新品。

随着再制造概念深入人心、再制造产业蓬勃发展,再制造产品的质量控制和评价备受关注。经表面工程技术处理过的再制造产品表面的服役寿命演变规律等基础理论成为再制造研究领域的热点问题。简言之,就是再制造表面涂层的寿命研究和评价问题,该问题的研究是对再制造工程基础理论体系的有机补充和完善,具有深邃的科学意义;同时也是再制造工程实践得以进一步推广、再制造产品得以广泛应用的前提和技术保障。

1.1.3 再制造工程与表面工程

再制造工程的重要技术支撑是表面工程技术。表面工程技术的优势是能够以多种方法制备出优于基体材料性能的表面涂层,从而提升装备的服役性能。对于机械零件,表面工程技术主要用于提高零件表面的耐磨性、耐蚀性、耐热性、抗疲劳强度等力学性能。统计结果表明,机电产品失效原因中约70%属于表面磨损和腐蚀,机电产品制造和使用中约1/3的能源直接消耗于摩擦磨损。可见,先进表面工程的技术特点与再制造工程需求珠联璧合,大有可为。近年来,随着表面工程技术的不断创新,各种更先进、更高效、更实用的技术应用到再制造工程领域,大大提升了再制造流程的效率,提高了再制造产品的质量。

表面工程是改善机械零件、电子电器元件等基质材料表面性能的一门专业学科。表面工程的概念提出于20世纪80年代,1988年以《表面工程》(1998年更名为《中国表面工程》)期刊的出版为标志,表面工程迅速在我国发展起来,成为以表面为研究核心,材料学、摩擦学、物理学、界面力学、表面力学及材料失效与防护、金属热处理、焊接等多个学科交叉、综合发展的新兴学科。

表面工程是表面预处理后,通过表面涂覆、表面改性或多种表面技术复合处理,改变固体金属或非金属表面的形态、化学成分、组织结构及应力状况等,来获得所需表面性能的系统工程。表面工程可用于提高机械零部件表面的耐磨、耐腐蚀、耐热及抗疲劳强度等力学性能,保证零部件在高温、高速、重载及腐蚀等工况条件下可安全持续运行;也可应用在电子电器元件表面的电、磁、声、光等方面,实现现代电子产品容量大、传输快、高可靠性与高转换率等性能。对于工艺品及产品包装表面的耐蚀性能及美观性,表面工程将实现产品外表美观与提高产品性能完美结合;对于生物医学材料,表面工程在提高人体植入物的耐磨、耐蚀及生物相容性方面贡献巨大。

随着表面工程的发展,表面改性技术、表面处理技术及表面涂覆技术相继出现。其中,表面改性技术是通过改变材料表面的化学成分达到改变表面结构和性能的一种表面技术。这一类的表面技术包括离子注入、化学热处理、转化膜等。表面处理技术是在不改变基质化学成分的基础上,通过改变表面组织结构从而改变材料表面性能的一种技术,如喷丸、淬火、纳米化加工等。而表面涂覆技术是在基质表面上形成一种膜层,包括物理气相沉积、化学气相沉积、电镀、电刷镀、化学镀、喷涂、熔覆、堆焊、涂装等。其与前两类技术比较,由于束缚条件少、技术类型和材料选择方面空间较大,应用较为广泛。在工程应用中,表面改性技术和表面处理技术均为无膜类型,只有表面涂覆技术存在薄膜与厚膜之分。

随着现代工业的发展,对机械产品零部件表面性能的要求逐渐提高,可在高速、高温、高压、重载及腐蚀介质等恶劣工况下可靠而持续地工作的零部件成为人们关注的重点,这对制造技术提出了挑战。这一挑战推动了表面工程学科的发展,并使得先进的表面工程技术(复合表面工程技术、纳米表面工程技术等)在制造业中应运而生。虽然表面工程形成一门独立的学科仅有 30 多年的历史,但其发展迅速、涉及范围广泛,对人们生产生活产生了巨大影响。

1.1.4 再制造与疲劳寿命评估

在再制造产业蓬勃发展的同时,再制造产品的质量控制作为一个重要的基础理论问题备受关注。其中,如何从再制造零部件的随机损伤特征中提取出其寿命演变规律,对再制造产品进行寿命预测,成为再制造研究领域的热点和难点。

再制造过程中,废旧件作为“基体”,通过多种高新技术在废旧零部件

的失效表面生成涂覆层,恢复失效零件的尺寸并提升其性能,从而获得再制造产品。再制造产品的质量由废旧件(即再制造毛坯)原始质量和再制造恢复涂层质量两部分共同决定。其中,废旧件原始质量是制造质量和服役工况共同作用的结果,尤其是服役工况中含有很多不可控制的因素,一些危险缺陷常常在服役条件下生成并扩展,这将导致废旧件的再制造质量急剧下降;而再制造恢复涂层质量取决于再制造技术,即再制造材料、技术工艺和工艺设备等。在再制造零件使用过程中,依靠废旧件和修复涂层共同承担服役工况的载荷要求,控制再制造毛坯的原始质量和修复涂层的质量,就能够控制再制造产品的质量。

再制造前,质量不合格的废旧件将被剔除,不会进入再制造工艺流程。如果废旧件基体中存在超标的质量和性能缺陷,那么无论采用的再制造技术多么先进,再制造后零件形状和尺寸恢复得多么精确,其服役寿命和服役可靠性都难以保证。只有原始制造质量好,并且在服役过程中没有产生关键缺陷的废旧零部件才能够进行再制造,依靠高新技术在失效表面形成修复性强化涂层,使废旧件恢复尺寸、提升性能、延长寿命。

废旧件经过一个寿命周期的使用过程,具有制造成形的零件的基本尺寸,在服役过程中可能产生不同程度的早期损伤及缺陷。为保证再制造产品的质量,在准确评估废旧件剩余寿命的基础上,根据废旧件损伤状态,确定相应的再制造成形方案,选择适宜的再制造关键技术进行加工。再制造成形后,还要检测涂层质量及涂层与基体的结合质量,评价再制造产品的服役寿命,合格件才能够装配使用。

实现再制造产品的质量控制,就是通过严格把关,形成再制造产品的3个重要环节,即再制造前毛坯的质量控制、再制造成形过程的质量控制及再制造后涂层的质量控制,从而确保再制造产品性能不低于新品。疲劳寿命评估技术是再制造前毛坯的质量控制和再制造后涂层的质量控制的核心研究内容。再制造成形过程的质量控制是对再制造成形工艺的控制。再制造毛坯剩余疲劳寿命评估、再制造成形加工过程的质量检验、再制造涂层服役疲劳寿命评估等内容是上述3个重要环节中所采用的关键技术。

疲劳寿命是指试件或结构由开始加载至发生疲劳失效时的载荷循环数。零件剩余疲劳寿命是否足够维持下一个生命周期,是再制造产业化和规模化发展所面临的重大技术难题。再制造产品的安全疲劳寿命评估问题更是影响其社会接纳度的关键问题。因此进行废旧件和再制造产品的疲劳寿命评估技术研究对再制造高速发展极为重要。

疲劳寿命评估方法主要包括基于概率—应力—寿命($P-S-N$)曲线