

doi: 10.3969/j.issn.1007-9289.2013.05.001

## 再制造技术创新发展的思考\*

朱 胜

(装甲兵工程学院 再制造技术重点实验室, 北京 100072)

**摘 要:** 再制造作为建设环境友好型、资源节约型社会的重要技术抓手, 其重要地位和作用已经得到了共识。文中从产品裕度设计、技术进步及效益驱动 3 个方面, 阐述了再制造的实现基础; 从再制造过程的逆向反演、界面问题及质量控制方面, 论述了实现再制造面临的技术挑战; 重点叙述了在再制造设计规划技术、轻合金再制造技术和增材再制造技术的 3 个发展方向; 最后, 探讨了再制造在性能升级、智能化、绿色化与标准化领域的发展趋势。

**关键词:** 再制造; 创新发展; 资源; 环境

**中图分类号:** TH16      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1007-9289(2013)05-0001-05

### Ponderation and Analysis on Remanufacturing Technology Development

ZHU Sheng

(Science and Technology on Remanufacturing Laboratory, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072)

**Abstract:** Remanufacturing has been taken as the important technology measure for building environment friendship and resource conserving society. Realization foundation of remanufacturing has been described from the product margin design, technology progress and benefit drive, the technology challenge of realization remanufacturing was discussed from the remanufacturing process reverse derivation, interface problem and quality control, then in detail expounds the three main remanufacturing technology directions of remanufacturing design, light alloy remanufacturing technology and additive remanufacturing, finally probes into the remanufacturing development trends in the remanufacturing upgrade, intelligent remanufacturing, green and standardization remanufacturing.

**Key words:** remanufacturing; development; resource; environment

## 0 引 言

《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006-2020 年)》将资源与环境作为制约发展的瓶颈, 并在第三主题《制造业发展科技问题研究》中, 将“机械装备的自修复与再制造”列为 19 项关键技术之一, 作为解决资源与环境问题的重要手段。

再制造可以实现对废旧机电产品的资源化高级利用, 是实现节能减排的有效途径, 具有显著的资源节约和环境保护作用, 契合了中共十八大提

出的“五位一体”生态文明建设精神和《全球 2028 机械工程展望》倡导的“创造更清洁、更健康、更安全和可持续发展世界”的共识。

自上世纪末徐滨士院士在中国率先提出再制造概念以来, 通过十余年的理论技术研究和工程应用推进, 再制造的作用地位已经得到了充分认可, 中国已经将再制造列入《中华人民共和国循环经济促进法》和国家战略性新兴产业, 出台了《关于推进再制造产业发展的意见》等国家政策。徐

**收稿日期:** 2013-09-30; **修回日期:** 2013-10-12; **基金项目:** \* 国家自然科学基金(50975286, 51205408); 装备基础基金(9140A27030312JB3501); 全军军事科学研究计划课题(13QJJ003-041)

**作者简介:** 朱胜(1964-), 男(汉), 北京人, 教授, 博士; **研究方向:** 再制造技术

**网络出版日期:** 2013-10-12 11:31; **网络出版地址:** <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20131012.1131.001.html>

**引文格式:** 朱胜. 再制造技术创新发展的思考 [J]. 中国表面工程, 2013, 26(5): 1-5.

滨院士通过实现先进表面工程、寿命评估等技术在再制造工艺过程中的应用,构建了以“尺寸恢复和性能提升”为特征的再制造模式<sup>[1]</sup>,有效提升了再制造率,并推动建立了汽车、矿山设备、重载车辆和大型工业装备等行业的典型产品再制造产业化生产示范线<sup>[2]</sup>,先后在汽车、矿山设备、工程机械、机床、化工、冶金、能源、电力、航空、船舶等重点行业领域推广应用,促进了我国再制造产业发展,为循环经济和生态文明建设提供了有效技术支撑。

再制造能够实现老旧产品的“起死回生、修旧胜新”,但在再制造工程应用中,需要进一步明确再制造的实现基础,认识在再制造实现过程中所面临的技术挑战,并分析今后的技术发展重点,厘清再制造的总体发展趋势,为科学推进再制造实施提供支持。

## 1 再制造的实现基础

再制造之所以能够实现将废旧产品再制造成性能不低于新品的再制造产品,主要是由于产品的设计裕度、再制造的技术进步和巨大的效益驱动,三者形成的合力促进了再制造的迅速发展。

### 1.1 产品的设计裕度提供了再制造基础

产品的整体寿命是由其关键件的寿命所确定的,即产品到达寿命末端时,并不是所有零件都达到了其服役寿命,主要是由于少数关键零部件的磨损等失效原因而导致产品整体性能劣化,从而缩短了产品的服役寿命,或者因关键性能指标的缺失导致无法服役。而产品在设计时,为了保证产品整体的可靠性要求,其所有的零部件都会给予一定的设计裕度,造成零部件的实际可服役寿命超过产品的一次服役寿命周期。这种产品中零部件的设计裕度与实际工况的综合影响,就形成了产品中零部件寿命的不平衡性和分散性,即存在着异名零件寿命的不平衡性和同名零件寿命的分散性,使得产品退役时其大部分零件可以继续使用,或者经过表面修复后使用。例如,通常老旧设备中固定结构件多为长寿命设计,如箱体、支架、轴承座等;在运转件中,承担扭矩传递的主体部分使用寿命长,而摩擦表面使用寿命短(如活塞环、轴瓦等)。针对这些因表面磨损或腐蚀失效的零部件,在经过表面再制造技术处理或表面性能升级后,仍然能够满足产品一个或多个服役寿

命周期的要求。这种产品零部件的设计裕度,使得废旧产品中大量零件具有直接再服役使用或经再制造加工处理后服役使用的能力,这为再制造实施提供了物质基础。

### 1.2 技术进步使再制造成为可能

通常产品设计定型后,生产技术与加工工艺则比较固定,生产的产品要经过服役周期后才会退役报废,在此产品使用过程中,会曝露出相应的产品设计和使用中问题。再制造生产是一个明显滞后于制造过程的阶段,这期间科学技术的迅速发展进步,新材料、新技术、新工艺的不断涌现,都为再制造及性能升级提供了可能。主要表现在:一是再制造生产中能不断吸纳最先进的技术成果,应用新材料、新技术、新工艺来实现产品废旧零件的再制造恢复,例如,产品失效常见的磨损、划伤、腐蚀等形式,但当前的技术发展已经能够有效解决这些类型失效件尺寸和性能恢复,并且能够通过表面技术的应用,使得恢复后的零件具有更好的耐磨性。二是再制造新研发的特有技术,能够有效解决再制造工艺的关键技术问题,例如,针对毛坯件的寿命评估,开展了剩余寿命评估技术及设备的研究开发,促进了对再制造产品的质量控制。三是再制造过程可以直接借鉴制造过程中产品装配等成熟工艺方法,继承产品在设计时大部分零部件的几何参数精度要求及材料性能要求,减少再制造生产的设计量。四是针对功能落后的产品,可以通过先进技术的应用或新功能模块的嵌入等再制造升级方式,来提升再制造产品的性能质量或功能,在低成本、低消耗、低污染的情况下,使得功能退役的产品快速高效地满足用户的使用需求。这些技术进步造成的再制造技术后发优势,使得再制造成为可能。

### 1.3 巨大的效益潜力为再制造提供了驱动力

再制造的实现基础还来自于企业和政府的积极实施和大力推动。一是因再制造具有良好的经济效益和品牌价值,这为企业开展再制造提供了驱动力。由于大量废旧零件经再制造加工后的利用,极大降低了产品生产的设备投入、加工量和生产时间,使得再制造产品生产成本显著降低,具有明显的经济效益。同时,再制造节能减排作用明显,属于绿色制造,并且旧件的再制造可以为制造商的销售产品提供长期的售后服务,具有优质的品牌效益,这都为企业开展再制造提供了驱动力。

二是再制造具有明显的社会和生态效益,这提供了政府推进再制造发展的驱动力。再制造具有重要的环境和资源效益,是生态文明建设的重要抓手,并由于再制造产品的销售价格一般约为新品的一半左右,可为用户提供价廉物美的产品和较多的工作机会,促进了和谐社会发展,这些显著的生态、资源和社会效益,提供了政府大力推进再制造发展的驱动力。

## 2 实现再制造的技术挑战

再制造要将废旧产品生产成质量性能不低于新品的过程,需要从服役特性来研究再制造过程的逆向反演规律,从失效件的再制造加工中考虑成形界面问题,从满足再制造产品的质量要求方面考虑再制造质量控制,因此,再制造的实现过程面临着逆向反演、界面问题、质量控制三方面的挑战。

### 2.1 再制造过程的逆向反演

传统的制造过程是以原材料作为生产毛坯,产品零件制造是一个由材料成分、组织结构、加工工艺到服役性能的推演过程,而再制造生产是以废旧产品作为加工毛坯,主要针对失效零件开展的修复工作,所以其加工工艺设计步骤是首先要根据服役性能要求进行失效分析,推演出应具有的组织结构和材料成分,并选用合适的加工工艺的过程,是一个由服役性能向组织结构、材料成份和再制造加工工艺的逆向推演过程。且由于废旧毛坯数量和质量的 uncertainty,以及零件失效形式的个体化,使得再制造的生产过程无法如新件生产一样采用完全相同的工艺,实现废旧零件的再制造生产需要具有一定的工艺柔性,适时根据其失效形式、工况要求、材料性能等情况来进行工艺调整,实现再制造生产过程的逆向反演。

### 2.2 再制造的界面问题

损伤件零件的尺寸和性能恢复是再制造加工的核心任务,其主要是通过采用表面技术来实现损伤部件的修复,同时造成了再制造涂覆层与毛坯基体二元或多元复杂异质材料体系组成,使得存在着明显的界面问题,这也是影响再制造加工质量的重要因素。再制造的界面问题主要表现为再制造表面修复中的修复材料与基体材料不同,属于异质再制造,即成形材料与零件基体材质不同,这种异质成形再制造的界面行为与组织形成是远离平衡态过程,与同质相比,具有明显的难匹

配性和非均匀性特征。因此,异质再制造界面过程及材料组织结构形成是成形再制造实现的一个技术瓶颈。需要重点研究沉积材料在载能束作用下的同/异质界面行为和构建机制,研究再制造产品表面/界面寿命演变机制,并进一步研究异质基底对集约化材料在载能束作用下的组织遗传性,以及载能束多循环热冲击对沉积层和基体组织、性能的影响机制。

### 2.3 再制造的质量控制

再制造产品质量是再制造发展的灵魂,再制造产品质量是再制造发展的灵魂,但再制造生产面临着物流的不确定性和毛坯质量的非稳定性,不同的失效形式会造成不同的工艺模式,这给再制造质量控制带来了难题。因此,需要研究解决3个技术难点:一是废旧零件的剩余寿命评估技术,需要通过分析机械零部件服役工况下出现的不同失效模式和失效规律,依据材料学、力学、数学、物理及化学等寿命预测基础理论,采用模拟仿真与考核试验相结合的方法,针对新品设计功能要求及服役过程健康监测需求,建立分属于不同范畴的寿命预测技术,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。二是再制造过程质量控制技术,需要根据再制造毛坯件信息优选适宜的再制造成形工艺,在再制造成形过程中自动化、智能化实时监控再制造成形技术工艺的实施状态,保证涂覆层均匀一致和可靠结合。三是再制造产品服役寿命评估技术,需要根据再制造产品服役工况的要求,检测再制造成形技术形成的涂覆层的残余应力、硬度、结合强度等力学性能指标,综合涂层孔隙率、微观裂纹等缺陷信息,通过模拟计算,并进行接触疲劳试验及台架考核,综合评估再制造产品的服役寿命。另外,还需要根据再制造质量要求,建立相关的再制造质量标准,形成系统的再制造质量控制体系。

## 3 再制造技术的发展重点

再制造是一个随制造形式和技术发展趋势而不断创新发展的领域,根据当前再制造产业化中面临的主要技术挑战及发展趋势,需要重点开展以下3个领域的研究。

### 3.1 再制造设计与规划

再制造设计与规划是以提高再制造生产效益为目标,面向产品再制造的全系统过程进行产品

再制造能力优化设计与生产规划设计的技术方法,其发展可以满足对产品再制造性提升与评估的需求,保证实现再制造物流优化和科学生产管理,提高生产效益<sup>[3]</sup>。由于废旧产品物流和零件损伤形式的不确定性,导致了零部件再制造生产工艺的个性化,这需要针对再制造设计与规划技术开展以下研究:一是研究产品面向再制造性的绿色设计技术,形成面向产品全寿命周期的绿色再制造设计、再制造生产和再制造服务体系,提高再制造率;二是研究再制造生产系统规划技术,研究再制造生产设备、人员、技术等保障资源优化利用方式,提高再制造生产系统柔性化、集约化水平,形成先进的再制造生产管理技术体系;三是研究再制造物流优化设计与信息管理技术,设计并开发面向再制造全过程的再制造信息管理系统,构建用于再制造的废旧产品的高品质逆向物流体系,实现再制造信息的全域采集与管理控制;四是研究再制造升级设计与策略优化技术,形成科学的再制造升级策略规划方法。

### 3.2 增材再制造

增材再制造利用激光束、电子束、离子(等离子)束以及电弧等能量束和电场、磁场、超声波、火焰、电学能等能量实现机械零部件的再制造过程,是实现体积结构损伤件尺寸和性能成形恢复的主要技术手段,能够显著提高废旧产品的再制造率。目前基于机器人熔敷再制造成形技术可对缺损零件的三维扫描反求测量、成形路径规划与再制造成形,但对于复杂的体积损伤形式,仍有许多增材再制造核心问题需要研究突破。例如,为实现装备零部件的快速近净成形再制造技术,需要研制高稳定性的能束能场再制造成形系统;超大零部件远距离加工技术将是未来解决大型装备、重型机械再制造问题的重要途径,需要研究利用超高功率能束实现大型零件再制造成形等;需要研究运用CAD、CAM技术与高精度的能束成形技术相结合方法,实现体积损伤件的快速增材再制造;研究将激光与电弧、激光与等离子、电弧与磁场等不同的能量形式进行复合,实现不同材料、不同形状、不同尺寸零部件的增材再制造过程。

### 3.3 轻合金再制造

铝、镁、钛等金属密度小,其形成的轻合金材料有较高的比强度和比刚度等优异特性,在汽车、航空等领域的产品中应用日益增多。轻合金材料

的失效模式不同于普通钢铁材料,目前尚缺乏有效的修复手段,也影响了对这类零件的再制造能力。而轻合金件一般价相对都比较高,其在产品中的比重也越来越大,开展轻合金的再制造对于提升再制造率和再制造效益都具有重要意义。目前,中国已开展了超音速微粒沉积、磁控熔覆成形、微弧氧化等轻合金再制造的应用基础研究和关键技术开发工作,初步构建了轻合金再制造的理论和技術体系,但还需要重点研究轻合金的失效机理,探索轻合金表面涂层与基体的界面结合机理,研发新型的轻合金表面损伤和结构损伤成形恢复设备,系统建立轻合金再制造质量控制体系、技术标准体系和质量认证体系,提升轻合金零部件的再制造效益,并确保再制造产品的质量可靠稳定、服役安全。

## 4 再制造的创新发展

产品再制造将会围绕着产品发展趋势、再制造生产特点及再制造质量保证等要求,向着再制造升级、智能化再制造、绿色化和标准化再制造方向发展。

### 4.1 再制造升级将越来越重要

当前的再制造模式,侧重于对达到物理寿命退役产品的原性能恢复,使再制造产品性能达到新品性能要求。但随着再制造逐渐由零件再制造、部件再制造向产品级的再制造发展,再制造的产品也逐渐由机械产品向机电产品的再制造发展,越来越多的产品将面临着因技术落后而退役,若仅恢复原产品的性能,则生成的再制造产品无法满足用户需求,所以,针对性能落后产品的再制造,需要在再制造生产中,通过新模块嵌入、结构改造等再制造升级方式,提升再制造后产品的性能和功能,满足用户对再制造产品功能的高水平要求;或者对原产品进行结构改进,经过再制造升级改造后赋予其它的功能和用途。经过再制造升级改造后赋予其它的功能和用途。当前在再制造升级改造领域可实现的升级目标有:提高产品可靠性,延长使用寿命,提高精度,扩展功能,改变产品用途,增强可监控性,简化保养,减少能耗,降低环境污染等。因此,再制造升级将是再制造发展的重要趋势,而且大有可为。

### 4.2 智能化是再制造生产发展方向

传统的再制造方式针对的是大量废旧产品及

其零部件开展的批量化的再制造生产方式,其生产具有一定的刚性,但随着人们需求的多样化和个性化,越来越多的产品都属于小批量生产,不可能产生大批量的退役产品,这要求再制造的生产模式要实现由大批量生产向小批量生产转变。同时,由于废旧产品失效形式及其物流的不确定性,造成了其生产工艺过程的个性化,需要实现生产系统由刚性生产方式向柔性生产方式转变。因此,未来的再制造生产方式,将会实现再制造生产系统的柔性化和智能化,自动适应产品类型、产量需求、失效模式等不确定因素对生产方式的个性化影响。

#### 4.3 实现再制造的绿色化和标准化

再制造生产本身是一种绿色制造模式,再制造的绿色化体现在:一是将会越来越多的机电产品在产品的设计阶段就考虑再制造的绿色性,使得新产品设计时能够开展再制造性设计,并使再制造产品具有较高的绿色性,保证再制造的绿色设计特性;二是对于没有进行再制造性设计的产品进行再制造时,需要科学规划其再制造工艺,实现无损拆解和绿色清洗,提升再制造率,减少再制造过程的“三废”排放量,使再制造过程更加绿色高效。为了保证再制造产品质量,必须要实现再制造的标准化,一是通过制订和完善再制造工艺过程中的各项标准,实现再制造产品生产品质的标准化控制;二是通过制订再制造的系列标准,来进一步推进再制造的发展,实现再制造产业的做大做强目标。

#### 5 结束语

文中从环境、资源两方面深入了解再制造的重要作用 and 地位的同时,重点阐述了以下问题:

(1)产品的设计裕度为再制造提供了物质基础,技术进步提供了可能,显著的效益潜力提供了巨大的驱动力。

(2)再制造不同于传统的制造过程,其面临着特有的再制造过程的逆向反演、异质界面问题和

多种不确定因素下的质量控制等问题。

(3)为了促进再制造关键技术问题的解决,提高再制造效益,需要重点开展再制造设计与规划、增材再制造、轻合金再制造等技术与应用。

(4)随着技术的快速进步和产品制造的个性化、小批量发展趋势,再制造将向着再制造升级、智能化、标准化和绿色化的方向发展。

但总体来说,再制造是一个政府、企业、用户间“三赢”的过程:政府通过推进再制造产业,可以支撑解决影响国家发展的环境与资源问题,实现由追求 GDP 向追求生态文明建设的转变;企业通过开展再制造,能够实现既循环又经济,能获得明显的经济效益和良好的品牌形象;用户可以从再制造中获得价廉物美的产品,提高服务水平。前人栽树,后人乘凉,我们应该给子孙怎样留下绿色地球,再制造是答案之一。

再制造是一个政府、企业、用户间“三赢”的过程:政府通过推进再制造产业,可以支撑解决影响国家发展的环境与资源问题,实现由追求 GDP 向追求生态文明建设的转变;企业通过开展再制造,能够实现既循环又经济,能获得明显的经济效益和良好的品牌形象;用户可以从再制造中获得价廉物美的产品,提高服务水平。前人栽树,后人乘凉,我们应该给子孙怎样留下绿色地球,再制造是答案之一。

#### 参考文献

- [1] 徐滨士. 中国特色的再制造产业及其创新发展 [J]. 电焊机, 2012, 42(5): 1-5.
- [2] 徐滨士. 绿色再制造工程的发展现状和未来展望 [J]. 中国工程科学, 2011, 11(1): 4-9.
- [3] 中国机械工程学会编著. 中国机械工程技术路线图 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2011: 138-158.

作者地址: 北京市丰台区杜家坎 21 号  
装甲兵工程学院再制造技术重点实验室  
Tel: (010) 6671 7206  
E-mail: zusg@sina.com

100072