

# 再制造 技术与工艺

朱 胜 姚巨坤 编著



 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



# 再制造技术与工艺

朱 胜 姚巨坤 编著



机械工业出版社

本书介绍了再制造技术与工艺的概念内涵、技术特点、工程应用及发展方向,系统地构建了再制造技术与工艺体系,阐述了再制造技术与工艺的典型工程应用方法。具体内容包括再制造性设计与评价技术、再制造拆装技术与工艺、再制造清洗技术及工艺与检测技术、表面再制造加工技术与工艺、再制造机械加工技术与工艺、再制造产品试验和涂装技术与工艺、先进再制造工程管理技术与方法、智能化再制造技术等,对生产实践具有较强的指导意义。

本书可供从事机械产品设计、制造、使用、维修、再制造、资源化的工程技术人员、管理人员、研究人员参考,也可作为机械维修、再制造、资源化等专业的教材。

### 图书在版编目(CIP)数据

再制造技术与工艺/朱胜,姚巨坤编著. —北京:机械工业出版社,2010.12  
ISBN 978-7-111-32336-5

I. ①再… II. ①朱… ②姚… III. ①制造工业—再生资源—资源利用  
IV. ①X76

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第208013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:吕德齐 责任编辑:吕德齐 高依楠

版式设计:张世琴 责任校对:陈延翔

封面设计:姚毅 责任印制:乔宇

三河市国英印务有限公司印刷

2011年1月第1版第1次印刷

184mm×260mm·16.5印张·359千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-32336-5

定价:38.00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) 88379772

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

# 前 言

再制造工程是落实“循环经济”纲略的重要举措，是循环经济的高级形式，已经受到国家领导人及国家相关政府部门的大力支持与积极推动，被列为国家战略型新兴产业。为推动循环经济形成较大规模，培育新的经济增长点，国家发展和改革委员会将会同有关部门编制《再制造产业发展规划》，明确“十二五”时期我国促进再制造产业健康发展的目标、重点任务和保障措施；并将会同有关部门抓紧修订相关法规，消除再制造产业发展的法律障碍，推动工程机械、机床等产品的再制造，提高技术水平，扩大推广应用。这些政策措施的制定与执行，必将快速推进我国再制造产业的迅猛发展。

再制造技术与工艺是再制造工程的核心组成部分，对再制造的产业化发展具有重要推动作用。随着我国再制造的工程化应用及其产业的快速发展，需要对当前再制造技术与工艺的内容进行整理编写并出版，以期可以指导工程应用，并供技术人员参阅来了解和指导再制造生产过程的工程实践。在此背景下，作者充分利用本单位在再制造技术研究及应用方面的优势，结合作者及所在单位多年来的研究成果和工程实践，经过广泛调研和资料收集整理，总结吸收了成熟的技术经验，以实际再制造生产中的实际技术与工艺应用过程为纲目，编写了本书。

全书共分9章，介绍了再制造技术与工艺的概念内涵、技术特点、工程应用及发展方向，系统地构建了再制造技术与工艺体系，阐述了再制造技术与工艺的典型工程应用方法。具体内容包括再制造性设计与评价的技术方法、再制造拆装技术方法及应用、再制造清洗与检测技术及应用案例、表面再制造加工技术及应用工艺、再制造机械加工技术及应用、再制造产品试验与涂装技术、先进再制造工程管理技术与方法、智能化再制造技术等。全书由朱胜教授与姚巨坤副教授编写并统稿，崔培枝博士参与了部分章节的编写，研究生梁媛媛、王启伟、韩国峰等参与了文献收集整理及书稿校对工作，在此一并表示感谢。

本书在编写过程中，既考虑到再制造技术的理论性，编写了相关技术理论基础内容，也考虑到实用性，在各章节均安排了技术与工艺的具体应用，对生产实践具有较强的指导意义。本书可供从事机械产品设计、制造、使用、维修、再制造、资源化的工程技术人员、管理人员、研究人员参考，也可作为机械维修、再制造、资源化等专业的教材。

特别感谢国家自然科学基金委员会、装备再制造技术国防科技重点实验室、济南复强动力有限公司等单位给予的大力支持。本书还得到了材料加工工程北京市重点学科、军队“2110工程”重点建设学科的支持，在此表示衷心感谢。同时，衷心感谢机械工业出版社对本书出版所做的大量细致工作。本书部分内容参考了同行的著作及研究报告，在此谨向各位作者致以诚挚的谢意。

由于作者水平有限，且再制造技术与工艺涉及内容丰富，发展迅速，不足之处在所难免，我们衷心希望得到读者的指正。

作 者

# 目 录

## 前言

## 第1章 绪论 ..... 1

- 1.1 基本概念 ..... 1
- 1.2 再制造技术与工艺的分类 ..... 2
- 1.3 再制造技术的重点发展内容 ..... 4
- 1.4 再制造技术的特点 ..... 5
- 1.5 再制造技术的作用 ..... 6
- 1.6 再制造技术的发展趋势 ..... 7

## 第2章 再制造性设计与评价技术 ..... 9

- 2.1 再制造性基础 ..... 9
  - 2.1.1 基本概念 ..... 9
  - 2.1.2 再制造性函数 ..... 10
  - 2.1.3 再制造性参数 ..... 11
  - 2.1.4 再制造技术性设计要求 ..... 13
- 2.2 再制造性设计技术与方法 ..... 14
  - 2.2.1 再制造性分析 ..... 14
  - 2.2.2 再制造性建模 ..... 16
  - 2.2.3 再制造性分配 ..... 20
  - 2.2.4 再制造性预计 ..... 22
  - 2.2.5 再制造性试验与评定方法 ..... 25
- 2.3 面向再制造的产品材料设计与评价 ..... 27
  - 2.3.1 概述 ..... 27
  - 2.3.2 面向再制造的材料设计因素 ..... 28
  - 2.3.3 专家分析评估法及应用 ..... 29
- 2.4 废旧产品再制造性评价方法 ..... 30
  - 2.4.1 再制造性影响因素分析 ..... 30
  - 2.4.2 再制造性的定性评价 ..... 31
  - 2.4.3 再制造性的定量评价 ..... 32

## 第3章 再制造拆装技术与工艺 ..... 40

- 3.1 再制造拆装基础 ..... 40
  - 3.1.1 再制造拆装基本概念 ..... 40
  - 3.1.2 再制造拆装特点 ..... 41
  - 3.1.3 常用再制造拆装工具 ..... 41

- 3.1.4 再制造拆装技术发展趋势 ..... 43

## 3.2 再制造拆解技术与工艺 ..... 44

- 3.2.1 再制造拆解分类 ..... 44
- 3.2.2 再制造拆解的要求及规则 ..... 45
- 3.2.3 再制造拆解技术方法 ..... 46
- 3.2.4 典型连接件的拆解 ..... 49

## 3.3 再制造装配技术与工艺 ..... 52

- 3.3.1 再制造装配的特点及类型 ..... 52
- 3.3.2 再制造装配的工作内容 ..... 53
- 3.3.3 再制造装配精度要求 ..... 53
- 3.3.4 再制造装配工艺方法 ..... 54
- 3.3.5 再制造装配工艺的制订 ..... 56
- 3.3.6 典型件的再制造装配 ..... 57

## 3.4 再制造拆装工艺应用 ..... 63

- 3.4.1 废旧发动机再制造拆解工艺 ..... 63
- 3.4.2 再制造发动机装配工艺 ..... 64
- 3.4.3 柴油机燃油供给系统的拆装 ..... 66

## 第4章 再制造清洗技术及工艺与检测技术 ..... 70

### 4.1 再制造清洗基础 ..... 70

- 4.1.1 基本概念 ..... 70
- 4.1.2 再制造清洗影响因素 ..... 70
- 4.1.3 再制造清洗的基本要素 ..... 71
- 4.1.4 再制造清洗阶段及要求 ..... 72
- 4.1.5 再制造清洗内容 ..... 72

### 4.2 再制造清洗技术 ..... 74

- 4.2.1 物理法再制造清洗技术 ..... 74
- 4.2.2 化学法再制造清洗技术 ..... 81
- 4.2.3 先进再制造清洗技术及发展趋势 ..... 88

### 4.3 再制造清洗技术与工艺应用 ..... 89

- 4.3.1 典型材料的再制造清洗应用 ..... 89
- 4.3.2 典型零部件的再制造清洗应用 ..... 92

4.4	再制造检测基础	93	5.5.1	表面强化技术	152
4.4.1	要求及作用	93	5.5.2	离子注入技术	153
4.4.2	再制造毛坯检测的内容	94	5.5.3	低温离子渗硫技术	155
4.4.3	机械零部件的失效形式分析	95	5.6	零件表面再制造技术的应用	156
4.4.4	废旧毛坯件检测方法	102	5.6.1	曲轴的再制造恢复	156
4.5	零部件再制造质量检测技术	104	5.6.2	气缸体主轴承孔的再制造	158
4.5.1	零件几何参数检测技术与方法	104	5.6.3	舰船钢板的再制造延寿	160
4.5.2	零件力学性能检测	108	5.6.4	大型发酵罐的再制造延寿	161
4.5.3	零件无损检测技术	110	5.6.5	发动机凸轮轴轴颈的再制造	162
4.6	典型件再制造检测应用	118	5.6.6	典型零件的激光再制造	163
4.6.1	轴类零件的几何参数检测	118	5.6.7	绞吸挖泥船绞刀片再制造	166
4.6.2	箱体类零件的检测	120	<b>第6章 再制造机械加工技术与工艺</b>		169
4.6.3	齿轮的检测	121	6.1	再制造机械加工特点及作用	169
4.6.4	轴承的检测	123	6.1.1	机械加工的特点	169
4.6.5	弹簧弹性检测	124	6.1.2	机械加工在再制造中的作用	169
<b>第5章 表面再制造加工技术与工艺</b>		126	6.2	失效件常用再制造机械加工方法	170
5.1	再制造加工基础	126	6.2.1	再制造修理尺寸法	170
5.1.1	基本概念	126	6.2.2	钳工再制造恢复法	171
5.1.2	再制造加工方法分类与选择	127	6.2.3	附加零件恢复法	173
5.1.3	表面再制造技术的应用	127	6.2.4	局部更换和换位法	174
5.2	表面镀层再制造技术	128	6.2.5	塑性变形法	175
5.2.1	电镀技术	128	6.3	零件表面再制造涂层的机械加工技术	175
5.2.2	化学镀技术	129	6.3.1	再制造涂层切削加工的特点	176
5.2.3	电刷镀技术	130	6.3.2	再制造涂层的车削加工	176
5.2.4	纳米复合电刷镀技术	132	6.3.3	再制造涂层的磨削加工	180
5.3	表面涂层再制造技术	135	6.3.4	再制造涂层的特种加工技术	181
5.3.1	热喷涂技术基础	135	6.4	典型废旧件再制造机械加工	183
5.3.2	高速电弧喷涂技术	136	6.4.1	发动机缸体与缸盖的再制造加工工艺	183
5.3.3	氧-乙炔火焰喷涂技术	138	6.4.2	曲轴再制造加工工艺	185
5.3.4	微纳米等离子喷涂技术	139	6.4.3	连杆再制造加工工艺	186
5.3.5	表面粘涂技术	140	<b>第7章 再制造产品试验和涂装技术与工艺</b>		188
5.4	表面覆层再制造技术	142	7.1	再制造产品磨合试验技术	188
5.4.1	焊接技术	142	7.1.1	基本概念	188
5.4.2	微脉冲冷焊技术	147			
5.4.3	激光再制造技术	149			
5.4.4	氧-乙炔火焰粉末喷熔技术	151			
5.5	表面改性再制造技术	152			

7.1.2	磨合的影响因素	188	8.4.1	基本概念	215
7.1.3	再制造产品整装试验	189	8.4.2	成组技术在再制造生产中的 应用	215
7.1.4	再制造产品磨合试验系统 组成	190	8.5	清洁再制造生产管理方法	217
7.1.5	典型再制造产品及零部件的 磨合试验	191	8.5.1	基本概念	217
7.2	再制造产品涂装技术与工艺	197	8.5.2	再制造过程的清洁生产应用	217
7.2.1	概述	197	8.6	再制造资源计划管理方法	219
7.2.2	涂装工具设备	197	8.6.1	基本概念	219
7.2.3	油漆涂装工艺	198	8.6.2	现代化再制造生产对 MRP—II 的 需求	220
7.3	再制造产品包装技术与工艺	200	8.6.3	再制造的生产资源管理	220
7.3.1	定义及分类	200	8.6.4	再制造的生产过程管理方法	222
7.3.2	产品包装材料及容器	200	8.7	再制造质量管理技术方法	223
7.3.3	再制造产品包装技术	201	8.7.1	基本概念	223
7.3.4	再制造产品的绿色包装	202	8.7.2	再制造质量管理方法	223
7.3.5	再制造产品质保附件	203	8.7.3	再制造工序的质量管理	224
8.7.4	再制造质量控制技术方法	224	8.7.4	再制造质量控制技术方法	224
<b>第8章</b>	<b>先进再制造工程管理技术与 方法</b>	<b>205</b>	<b>第9章</b>	<b>智能化再制造技术</b>	<b>229</b>
8.1	面向再制造全过程的管理 内容与方法	205	9.1	虚拟再制造及其关键技术	229
8.1.1	基本概念	205	9.1.1	基本定义及特点	229
8.1.2	再制造管理影响因素分析	205	9.1.2	虚拟再制造系统的开发环境	230
8.1.3	再制造管理主要内容	206	9.1.3	虚拟再制造系统的体系结构	230
8.1.4	再制造工程管理体系	207	9.1.4	虚拟再制造的关键技术	231
8.2	基于再制造的多寿命周期 管理技术	208	9.1.5	虚拟再制造的应用	232
8.2.1	基本概念	208	9.2	柔性再制造及其关键技术	233
8.2.2	产品多寿命周期管理的发展 基础	209	9.2.1	基本概念及特点	233
8.2.3	基于再制造的产品多寿命周期 管理基础	210	9.2.2	柔性再制造系统的组成	234
8.2.4	基于再制造的产品多寿命周期 关键技术	211	9.2.3	柔性再制造系统的技术模块	235
8.3	精益再制造生产管理方法	213	9.2.4	柔性再制造的关键技术	236
8.3.1	基本概念	213	9.2.5	柔性再制造系统的应用	236
8.3.2	再制造中的精益生产模式 应用	213	9.3	网络化再制造及其关键技术	237
8.4	成组再制造生产管理技术 方法	215	9.3.1	基本概念	237
			9.3.2	网络化再制造的重要特性	239
			9.3.3	网络化再制造的系统模型	239
			9.3.4	网络化再制造的关键技术	240
			9.4	快速响应再制造及其关键 技术	241
			9.4.1	基本概念	241
			9.4.2	快速响应再制造的作用	241

---

9.4.3 快速响应再制造的关键技术 ···	242	9.6 信息化再制造升级及其	
9.5 快速再制造成形系统及其		方法 ···········	249
技术 ···········	243	9.6.1 概述 ···········	249
9.5.1 发展背景及概念·····	243	9.6.2 信息化再制造升级的类型 ·····	249
9.5.2 快速再制造成形技术思路 ·····	244	9.6.3 装备信息化再制造升级改造	
9.5.3 系统工作原理及程序 ·······	245	的特点 ···········	250
9.5.4 机器人 MIG 堆焊再制造成形		9.6.4 信息化再制造升级方法 ·······	250
系统设计 ···········	246	<b>参考文献</b> ·····	252



# 第 1 章 绪 论

随着资源的日益枯竭和环境污染的加剧，人们逐渐认识到可持续发展的重要意义，并不断探索实现可持续发展的手段。再制造工程就是人类在资源日益匮乏和环境污染加剧的情况下形成的一门新的工程学科，且因其巨大的资源、环境、社会效益而受到世界各国的重视，成为发展循环经济、实现节能减排的重要支撑。再制造工程中的再制造技术与工艺是保证再制造产品质量、节约再制造费用、提高再制造效益的核心内容及重要途径，已经成为再制造领域研究及应用的热点，推动着再制造工程应用的发展。

## 1.1 基本概念

### 1. 产品

产品用来泛指任何元器件、零部件、组件、设备、分系统、系统或软件。产品因物理或技术原因退出服役后，即成为废旧产品。再制造通常以废旧机电产品作为加工对象，并称之为毛坯。再制造加工的废旧产品是广义的，既可以是设备、系统、设施，也可以是其零部件，既包括硬件，也包括软件。

废旧机电产品中含有高附加值。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%。在一台机器中，各部件的使用寿命不相等，每个零件的各工作表面的使用寿命也不相等，往往会因局部表面失效而造成整个机器报废。通过再制造工程对机器的局部损伤进行修复，可以最大限度地挖掘出废旧机电产品中蕴含的附加值，达到节省资金、节能、节材和保护环境的效果。

### 2. 再制造

再制造是指将废旧机电产品运用高科技手段进行专业化修复或升级改造，使其质量和性能恢复到新品的批量化制造过程。简而言之，再制造工程是废旧产品高技术修复、升级改造的产业化。再制造使产品全寿命周期由开环变为闭环，由单一寿命周期变为循环多寿命周期。再制造的重要特征是再制造产品的质量和性能能够达到甚至超过新品，而成本只为新品的 50%，节能 60%，节材 70%，对环境的不良影响显著降低。再制造工程包括两个主要部分：

1) 再制造加工，即达到物理寿命和经济寿命而报废的产品，在失效分析和寿命评估的基础上，把其中有剩余寿命的废旧零部件作为再制造毛坯，采用先进技术进行加工，使其性能迅速恢复，甚至超过新品。

2) 过时产品的性能升级。性能过时的机电产品往往是几项关键指标落后，不等于所有的零部件都不能再使用，采用新技术镶嵌的方式对其进行局部改造，就可以使原产品满足时代的性能要求。信息技术、微纳米技术等高科技在提升、改造过时产品性能方面有重要作用。

### 3. 再制造技术

再制造技术是指将废旧产品及其零部件修复、升级成质量等同于或优于新品的各项技术的统称。简单地讲，再制造技术就是在废旧产品再制造过程中所用到的各种技术的统称。再制造技术是废旧产品再制造生产的重要支撑，是实现废旧产品再制造生产高效、经济、环保的保证，既是先进绿色制造技术，又是产品维修技术的创新发展。

### 4. 再制造工艺

再制造工艺就是运用再制造技术，将废旧产品进行加工，生成规定性能的再制造产品的方法和过程。其一般指再制造工厂内部的再制造工艺，包括拆解、清洗、检测、加工、零件测试、装配、磨合试验、喷涂包装等步骤。由于再制造的产品种类、生产目的、生产组织形式的不同，不同产品的再制造工艺也有所区别，但主要过程类似。图 1-1 就是通常情况下再制造工艺流程。

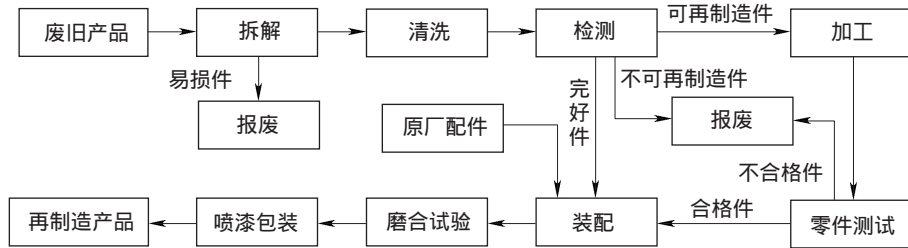


图 1-1 通常情况下再制造工艺流程

再制造工艺中还包括重要的信息流，例如对各步骤零件情况的统计，可以为掌握不同类别产品的再制造特点提供信息支撑。如果通过清洗后，检测统计到某类零件的损坏率较高，并且检测后发现该类零件恢复价值较小，低于检测及清洗费用，那么在再制造过程中可将该类零件直接丢弃，无需经过清洗等步骤，以提高生产效率；也可以在需要的情况下，对该类零件进行有损拆解，以保持其他零件的完好性。同时通过建立再制造产品整机的测试性能档案，可以为产品的售后服务提供保障。所以，再制造工艺的各个过程是相互联系的，不是孤立的。

## 1.2 再制造技术与工艺的分类

根据不同的目的、设备、手段等，对再制造技术进行分类。根据对废旧产品再制造工艺流程的分析以及再制造工程生产实践，可将再制造技术与工艺分为图 1-2 所示的几种。

### 1. 再制造拆解技术与工艺

再制造拆解技术与工艺是对废旧产品进行拆解的方法与技术工艺，是研究如何实现产品的最佳拆解路径及无损拆解方法，进而高质量地获取废旧产品零部件的技术工艺。它为废旧产品的再制造提供必要的基础和保证。

### 2. 再制造清洗技术与工艺

再制造清洗技术与工艺是采用机械、物理、化学和电化学等方法清除产品或零部件表面的各种污物（灰尘、油污、水垢、积炭、旧漆层和腐蚀层等）的技术和工艺过程。废旧产品及其零部件表面的清洗对零部件表面形状及性能鉴定的准确性、再制造产品质量和再制造

产品使用寿命均具有重要影响。

### 3. 再制造检测技术

对拆解后的废旧零部件进行检测是为了准确地掌握零件的技术状况，根据技术标准分出可直接利用件、可再制造恢复件和报废件。零件检测包括对零件几何参数和软科学性能的鉴定以及零件缺陷和剩余寿命的无损检测与评估，它直接影响产品的再制造质量、再制造成本、再制造时间以及再制造后产品的使用寿命。

### 4. 零件再制造加工技术与工艺

产品在使用过程中，一些零件因磨损、变形、破损、断裂、腐蚀和其他损伤而改变了零件原有的几何形状和尺寸，从而破坏了零件间的配合特性和工作能力，使部件、总成甚至整机的正常工作受到影响。零件再制造加工的任务是恢复有再制造价值的损伤失效零件的几何参数和力学性能，采用的方法包括表面工程技术和机械加工技术与方法。零件再制造加工是一门综合研究零件的损坏失效形式、再制造加工方法及再制造后性能的技术，是提高再制造产品质量、缩短再制造周期、降低再制造成本、延长产品使用寿命的重要措施，尤其对于贵重、大型零件及加工周期长、精度要求高的零件及需要特殊材料或特种加工的零件来说，其意义更为突出。

### 5. 再制造装配技术与工艺

再制造装配技术与工艺是在再制造装配过程中，为保证再制造装配质量和装配精度而采取的技术措施。再制造装配中要通过调整来保证零部件的传动精度，如间隙、行程、接触面积等工作关系，通过校正来保证零部件位置精度，如同轴度、垂直度、平行度、平面度、中心距等。再制造装配对废旧产品再制造质量和再制造后产品的使用寿命具有重要的直接影响。

### 6. 再制造产品磨合试验技术

重要机械产品经过再制造后，投入正常使用之前必须进行磨合试验，其主要目的是：发现再制造加工及装配中的缺陷，及时加以排除；改善配合零件的表面质量，使其能承受额定的载荷；减少初始阶段的磨损量，保证正常的配合关系，延长产品的使用寿命；在磨合和试验中调整各机构，使零部件之间相互协调工作。磨合与试验是提高再制造质量、避免早期故障、延长产品使用寿命的有效途径。例如，再制造发动机装配后，均要进行磨合试验。

### 7. 再制造产品涂装技术与工艺

再制造产品涂装技术与工艺是指对综合质量检测合格的再制造产品进行涂漆和包装的工艺技术和方法。其主要内容包括：①将涂料涂覆于再制造产品裸露零部件表面，形成具有防腐、装饰或其他特殊功能的涂层；②为在流通过程中保护产品、方便储运、促进销售，而按一定技术方法采用容器、材料及其他辅助物等对再制造产品进行的绿色包装；③印刷再制造产品的使用标志、使用说明书及质量保证单等产品附件，完善再制造产品的售后服务质量。

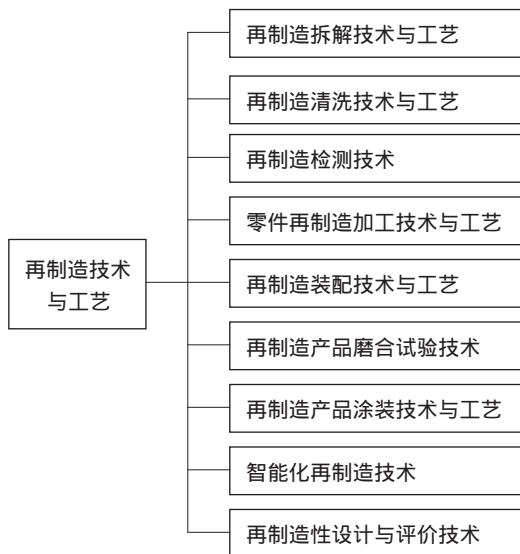


图 1-2 再制造技术与工艺分类

### 8. 智能化再制造技术

智能化再制造技术是指运用信息技术、控制技术来实施废旧产品再制造生产或管理的技术和手段。智能化再制造技术的应用,是实现废旧产品再制造效益最大化、再制造技术先进化、再制造管理正规化和产品全寿命过程再制造保障信息资源共享的基础,对提高再制造保障系统运行效率发挥着重要作用。柔性再制造技术、虚拟再制造技术、快速响应再制造等都属于智能化再制造技术的范畴,也将在再制造生产过程中发挥重要作用。

### 9. 再制造性设计与评价技术

再制造性设计与评价技术是指在产品设计过程中或废旧产品再制造前,设计并评价其再制造性,确定其能否以及如何进行再制造的技术或方法。在研制阶段就考虑产品的再制造性设计,能够显著提高产品末端时的再制造能力,增强再制造效益。产品末端的再制造性评价,能够形成科学的再制造方法,优化再制造工艺流程。

## 1.3 再制造技术的重点发展内容

根据再制造工业发展的趋势及要求,需要重点发展的再制造关键技术有以下几类:

1) 再制造性设计与评估技术。再制造性设计与评价技术是再制造所要考虑的首要理论问题,但目前还缺乏系统的研究及技术方法构建。对再制造性的评估可以通过采集大量影响产品再制造的技术性、经济性、环境性和服役性等信息,构建包括非线性多影响因素的数据集,并通过定性和定量相结合、模糊评判、综合权衡等方法,建立较为完善的再制造性设计与评估模型,提供科学的再制造方案。

2) 废旧件剩余再制造寿命评估技术。在产品再制造前,分析研究失效零部件磨损、断裂、变形、腐蚀和老化等失效现象的特征原因及规律,并利用涡流检测和磁记忆检测等无损检测手段完成废旧产品关键零部件的疲劳、裂纹、应力集中等缺陷的检测,并计算出剩余寿命。准确评估废旧产品或零部件的剩余寿命是科学合理地实施再制造加工的重要基础。

3) 面向全过程的再制造设计技术,是指在废旧产品再制造前,根据废旧产品的失效形式及其再制造后产品的性能要求,面向再制造生产全过程,对所采用的再制造技术单元、保障资源、再制造要素等内容进行全面规划,并通过优化组合,最终形成最优化产品再制造方案的过程。

4) 快速再制造成形技术,是指以损伤零部件为再制造毛坯,通过三维数据扫描及模型重建等数字化手段,采用基于机器人控制的金属零件快速成形方法,恢复零件原有几何形状及性能的技术。它是通过计算机、数控、高能束、新材料等高科技综合集成创新而发展起来的一项先进再制造技术,它将传统的减法加工(即去除加工)变为先进的加法加工(即堆积加工)。

5) 再制造质量控制技术,是指为保证再制造产品达到规定的质量、性能要求,在生产过程中所采取的多种质量控制方法,通常包括再制造毛坯的质量检测、再制造过程的在线质量监控及再制造产品的质量检测与评价。

6) 再制造升级技术,即利用先进的表面工程、电子信息、环境保护等新技术、新材料、新工艺,通过模块替换、结构改造、性能优化等手段,实现老旧设备在功能或技术性能上的提升,以满足更高使用需求的技术。

## 1.4 再制造技术的特点

再制造技术与工艺源于制造和维修技术与工艺，是某些制造和维修过程的延伸与扩展。但是，废旧产品再制造技术与工艺在应用目的、应用环境、应用方式等方面又不同于制造和维修技术与工艺，有着自身的特征。

### 1. 工程应用性

再制造技术直接服务于再制造生产保障活动，其主要任务是恢复或提升废旧产品的各项性能参数，实现对退役产品的再制造生产过程保障，是一门特征明显的工程应用技术，既要有技术成果的转化应用，又要有科学成果的工程开发，具有针对性很强的应用对象和特定的工作程序。同一再制造技术可由不同基础技术综合应用而成，同一基础技术在不同领域中的应用可形成多种再制造技术，工程应用性决定了再制造技术具有良好的实践特性。

### 2. 综合集成性

机电产品本身的制造及使用涉及多种学科，而对废旧产品的再制造技术也相应涉及产品总体和各类系统以及配套设备的专业知识，具有专业门类多、知识密集的特征。一方面，再制造技术应用的对象为各类退役产品，大到舰船、飞机、汽车，小到工业泵、家用小电器等多类产品；另一方面，它涉及机械、电子、电气、光学、控制、计算机等多种专业，既需要产品的技术性能、结构、原理等方面的知识，又需要检查、拆解、检测、清洗、加工、修理、储存、装配、延寿等方面的知识。因此，退役产品的再制造技术不仅包括各种工具、设备、手段，还包括相应的经验和知识，是一门综合性很强的复杂技术。

### 3. 先进适用性

再制造技术主要针对退役的废旧产品，要通过再制造技术来恢复、甚至提高废旧产品的技术性能，需要有特殊的约束条件，且技术难度很大，这就要求在再制造过程中必须采用比原产品制造更先进的高新技术。实际上，再制造技术的关键技术，如再制造毛坯快速成形技术、先进复合自动化表面技术、虚拟再制造技术、老旧产品的性能升级技术等，都属于高新技术范畴。再制造技术要与再制造生产对象相适应，但落后的再制造技术不可能对复杂结构的退役产品进行有效地再制造保障，针对复杂结构或材料损伤毛坯的再制造加工多采用先进的加法加工（如表面工程技术），使再制造技术具备先进性。同时，再制造产品的性能要求不低于新产品，因此采用的再制造技术既要适用，又要有很高的先进性，以保证再制造产品的使用性能。

### 4. 动态创新性

再制造技术应用的对象是各种不断退役的产品，不同产品随着使用时间的延长，其性能状态及各种指标也发生着相应变化。根据这些变化和不同的使用环境、不同的使用任务以及不同的失效模式，不同种类的废旧产品再制造技术保障应采取不同的措施，因此再制造技术也随之不断地弃旧纳新或梯次更新，呈现出动态性的特征。同时，这种变化也要求再制造技术在继承传统的基础上善于创新，不断采用新方法、新工艺、新设备，以解决产品因性能落后而被淘汰的问题。只有不断创新，再制造技术才能保持活力，适应变化。可见，创新性是再制造技术的又一显著特征。

### 5. 经济环保性

再制造过程实现了废旧产品的回收利用，生成的再制造产品在参与社会流通的过程中，能够在较低的消费支出下满足人们较高的产品功能需求，并且使再制造厂具有可观的经济效益。同时，再制造产品在与新产品同样性能的情况下，大量减少了材料及能源消耗，减少了产品生产过程中环境污染废弃物的排放，具有良好的环保效益。所以再制造技术的使用不但对生产者、消费者具有一定的经济性，还具有良好的综合环保效益。

## 1.5 再制造技术的作用

### 1. 先进制造技术的补充和发展

先进制造技术是制造业不断吸收信息、机械、电子、材料技术及现代系统管理的新成果，且将其综合应用于产品的全寿命周期过程，以实现优质、高效、低耗、清洁、灵活生产，并获得最佳的技术和经济效益的一系列通用的制造技术。再制造技术与先进制造技术具有同样的目的、手段、途径及效果，它已成为先进制造技术的组成部分。再者，一些重要的产品从论证设计到制造定型，直至投入使用，其周期往往需要十几年甚至几十年的时间，在这个过程中原有技术会不断改进，新材料、新技术和新工艺会不断出现。再制造产业能够在很短的周期内将这些新成果应用到再制造产品上，从而提高再制造产品质量、降低成本和能耗、减小环境污染，同时也可将这些新技术的应用信息及时地反馈到设计和制造中，大幅度提高产品的设计和制造水平。可见，再制造技术在应用最先进的设计和制造技术对报废产品进行恢复和升级的同时，还能够促进先进设计和制造技术的发展，为新产品的设计和制造提供新观念、新理论、新技术和新方法，缩短新产品的研制周期。再制造技术扩大了先进制造技术的内涵，是先进制造技术的重要补充和发展。

### 2. 全寿命周期管理内容的丰富和完善

目前，国内外越来越重视产品的全寿命周期管理。传统的产品寿命周期从设计开始，到报废结束。全寿命周期管理要求不仅要考虑产品的论证、设计、制造的前期阶段，而且还要考虑产品的使用、维修直至报废品处理的后期阶段。其目标是在产品的全寿命周期内，使资源的综合利用率最高，对环境的负影响最小，费用最低。再制造技术在综合考虑环境和资源效率的前提下，在产品报废后，能够高质量地提高产品或零部件的重新使用次数和重新使用率，从而使产品的寿命周期成倍延长，甚至形成产品的多寿命周期。因此，再制造技术是产品全寿命周期管理的延伸。其中的再制造性设计是产品全寿命周期设计的重要方面，要求设计人员在一开始就不仅考虑可靠性设计和维修性设计，还应该考虑再制造性设计以及产品的环保处理设计等，确保产品的可再制造的能力。产品的再制造性设计，使产品在设计阶段就为后期报废处理时的再制造加工或改造升级打下基础，以实现产品全寿命周期管理的目标。

### 3. 实现机电产品可持续发展的技术支撑

20 世纪是人类物质文明飞速发展的时期，也是地球环境和自然资源遭受最严重破坏的时期。保护地球环境、实现可持续发展，已成为世界各国共同关心的问题。可持续发展包括发展的持续性、整体性和协调性。而我国目前部分企业的工业生产模式不符合可持续发展的方针，主要表现一是环境意识淡薄，回收、再利用意识差，大多是“先污染，后治理”，二

是只注重降低成本，而不重视产品的耐用性和可再利用性，浪费严重。我国面临的资源能源短缺和环境污染严重的问题更为突出，发展生产和保护环境、节省资源已经成为日益激化的矛盾，解决这一矛盾的唯一途径就是从传统的制造模式向可持续发展的模式转变，即从高投入、高消耗、高污染的传统发展模式向提高生产效率、最高限度地利用资源和最低限度地产出废物的可持续发展模式转变。再制造技术就是实现这样的发展模式的重要技术途径之一。再制造技术在生态环境保护和可持续发展中的作用，主要体现在以下几个方面：①通过再制造性设计，在设计阶段就赋予产品减少环境污染和利于可持续发展的结构、性能特征；②再制造过程本身不产生或产生很少的环境污染；③再制造产品比制造同样的新产品消耗更少的资源和能源。

#### 4. 促进新的产业发展

据发达国家统计，每年因腐蚀、磨损、疲劳等原因造成的损失约占国民经济总产值的3%~5%。我国有几万亿元的设备资产，每年因磨损和腐蚀而使设备停产、报废所造成的损失都逾千亿元。面对如此大量设备的维修和报废后的回收，如何尽量减少材料和能源浪费、减少环境污染，最大限度地重新利用资源，已经成为亟待解决的问题。再制造技术能够充分利用已有资源（报废产品或其零部件），不仅满足可持续发展战略的要求，而且可形成一个高科技的新兴再制造产业，能创造更大的经济效益、就业机会和社会效益。随着产品更新换代和企业重组发展，我国多年建设所积累的价值数万亿元的设备、设施，正在经历着或面临着改造更新的过程。再制造技术不仅能够延长现役设备的使用寿命，最大限度发挥设备的作用，也能够对老旧设备进行高技术改造，赋予旧设备更多的高新技术含量，满足新时期的需要；它是以最少的投入来获得最大效益的回收再利用方法。再制造技术在21世纪将为国民经济的发展带来巨大的效益，并有望成为新世纪里新的经济增长点。

## 1.6 再制造技术的发展趋势

(1) 高效的表面工程技术应用将提高废旧产品再制造率。

产品零件的磨损与腐蚀失效是导致产品性能下降的重要因素，而采用高效的表面工程技术，将可以实现失效件的表面尺寸及性能的恢复或提升，从而改变当前以尺寸修复法和换件法为主的再制造产业生产模式，提高了废旧产品零部件的利用率，提升了再制造业的资源效益。

(2) 自动化再制造技术将适应再制造的批量生产要求。

再制造相对维修的重要特点是生产对象的批量化和规模化，因此，再制造生产线需要对批量的产品进行生产操作，这需要进一步发展自动化再制造技术，促进再制造生产效益。例如，通过开发发动机连杆自动化纳米电刷镀技术及设备，可以有效提高连杆生产效率和效益。通过利用机器人和自动控制技术的发展，可以实现自动化等离子喷涂技术在再制造中的应用。

(3) 再制造技术的柔性化将提高对再制造产品种类变化的适应性。

当前产品发展日益呈现出小批量、个性化的特点，传统的大批量产品的再制造生产方案将逐渐被小批量、多品种、个性化的产品再制造生产方案所代替，而且由于市场需求的迅速变化，将导致产生大量因技术原因而退役的产品，使得传统的性能恢复为主的再制造生产方

式也逐渐过渡到以产品性能升级与恢复并重的再制造模式。因此，在再制造生产线上，大量采用柔性化设备及生产工艺，能够迅速使再制造生产适应产品毛坯及生产目标的变化，实现快速的柔性化生产。

(4) 再制造技术的绿色化将进一步减少再制造生产的污染排放。

再制造工程对节能、节材、环境保护有重大效能，但是对具体的再制造技术，如再制造过程中的产品清洗、涂装、表面刷镀等均有“三废”的排放问题，仍会造成一定程度的污染。因此，需要进一步发展物理清洗技术，减少化学清洗方法的使用，采用无氰电镀技术，研制开发一些有利于环保的镀液。当前，在再制造工程领域，需要进一步重视环境保护，采用清洁生产模式，大量采用绿色化再制造技术，实现“三废”综合利用的目标。例如不断减少在再制造清洗中对化学清洗液的采用，更多地采用物理法来进行清洗，减少对环境的污染。