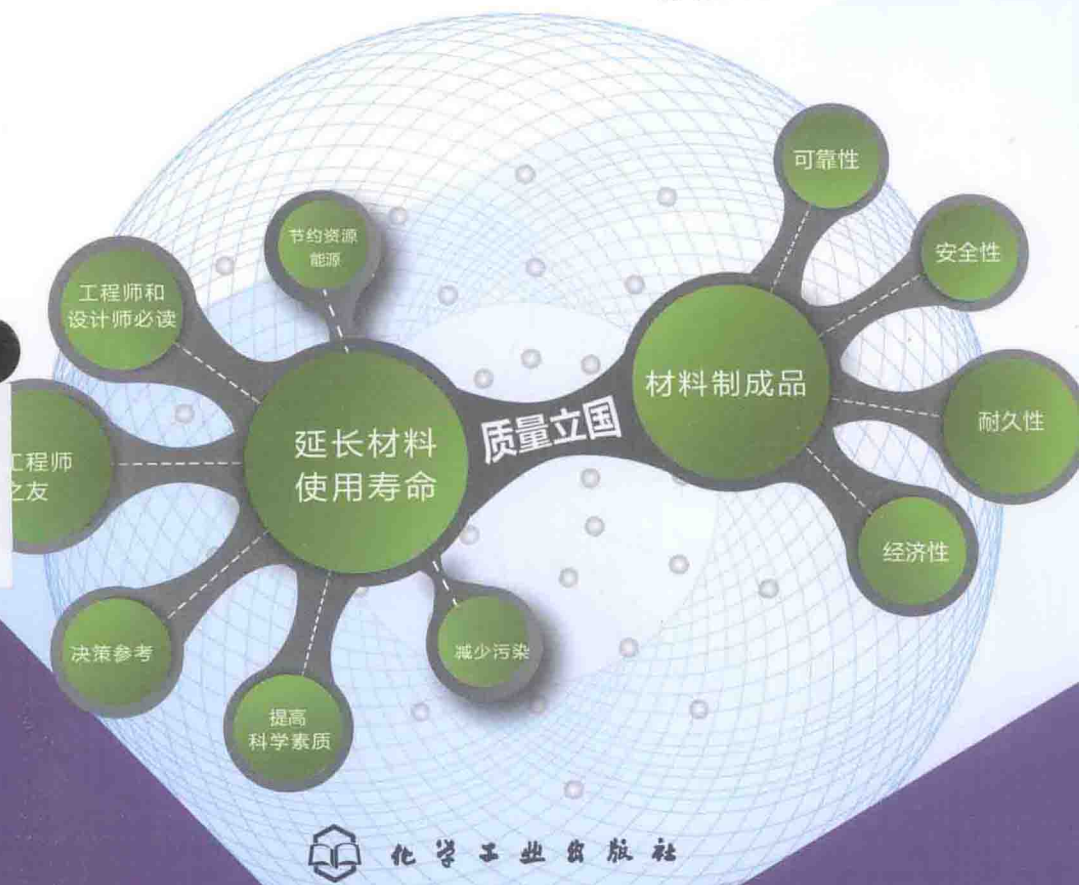




材料延寿与可持续发展

# 再制造技术与应用

《材料延寿与可持续发展》丛书总编委会 组织编写  
徐滨士 等编著



化学工业出版社



材料延寿与可持续发展

# 再制造技术 与应用

《材料延寿与可持续发展》丛书总编委会 组织编写  
徐滨士 等编著



化学工业出版社

· 北京 ·

《再制造技术与应用》是《材料延寿与可持续发展》丛书之一，是我国再制造专家徐滨士院士等创作的一本再制造理论与实践的新著。全书分两篇，上篇“再制造——战略型新兴产业”清晰地阐明再制造产业的概念、重大意义和基本理论，介绍汽车再制造等产业的发展状况；下篇“再制造实用技术”系统地阐述了再制造成熟的技术体系，即再制造拆解、清洗、检测、表面工程、机械加工、涂装和包装等技术原理和技术应用。

全书结构清晰，概念清楚，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。

#### 图书在版编目 (CIP) 数据

再制造技术与应用/徐滨士等编著. —北京：化学工业出版社，2014.12  
(材料延寿与可持续发展)  
ISBN 978-7-122-22380-7

I. ①再… II. ①徐… III. ①机械制造-再生资源-资源利用 IV. ①TH

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 273266 号

责任编辑：段志兵 王清颖  
责任校对：宋 玮

文字编辑：杨欣欣  
装帧设计：王晓宇

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011）  
印 刷：北京永鑫印刷有限责任公司  
装 订：三河市宇新装订厂

710mm×1000mm 1/16 印张 12½ 字数 210 千字 2015 年 2 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686） 售后服务：010-64518899  
网 址：<http://www.cip.com.cn>  
凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

定 价：36.00 元

版权所有 违者必究

## 《材料延寿与可持续发展》丛书顾问委员会

主任委员：师昌绪

副主任委员：严东生 王淀佐 干 勇 肖纪美

委 员（按姓氏拼音排序）：

|     |     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 安桂华 | 白忠泉 | 才鸿年 | 才 让 | 陈光章 | 陈蕴博 |
| 戴圣龙 | 俸培宗 | 干 勇 | 高万振 | 葛昌纯 | 侯保荣 |
| 柯 伟 | 李晓红 | 李正邦 | 刘翔声 | 师昌绪 | 屠海令 |
| 王淀佐 | 王国栋 | 王亚军 | 吴荫顺 | 肖纪美 | 徐滨士 |
| 严东生 | 颜鸣皋 | 钟志华 | 周 廉 |     |     |

## 《材料延寿与可持续发展》丛书总编辑委员会

名誉主任（名誉总主编）：

干 勇

主 任（总主编）：

李金桂 张启富

副 主 任（副总主编）：

许淳淳 高克玮 顾宝珊 张 炼 朱文德 李晓刚

编 委（按姓氏拼音排序）：

|     |     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 白新德 | 蔡健平 | 陈建敏 | 程瑞珍 | 窦照英 | 杜存山 |
| 杜 楠 | 干 勇 | 高克玮 | 高万振 | 高玉魁 | 葛红花 |
| 顾宝珊 | 韩恩厚 | 韩雅芳 | 何玉怀 | 胡少伟 | 胡业锋 |
| 纪晓春 | 李金桂 | 李晓刚 | 李兴无 | 林 翠 | 刘世参 |
| 卢凤贤 | 路民旭 | 吕龙云 | 马鸣图 | 沈卫平 | 孙 辉 |
| 陶春虎 | 王 钧 | 王在建 | 武兵书 | 熊金平 | 许淳淳 |
| 许立坤 | 许维钧 | 杨卯生 | 杨文忠 | 袁训华 | 张 津 |
| 张 炼 | 张启富 | 张晓云 | 赵 晴 | 周国庆 | 周师岳 |
| 周伟斌 | 朱文德 |     |     |     |     |

办 公 室：袁训华 张雪华

## 《材料延寿与可持续发展》丛书指导单位

中国工程院

中国科学技术协会

## 《材料延寿与可持续发展》丛书合作单位

中国腐蚀与防护学会

中国钢研科技集团有限公司

中航工业北京航空材料研究院

化学工业出版社

# 总序言

在远古人类处于采猎时代，依赖自然，听天由命；公元前一万年开始，人类经历了漫长的石器时代，五千多年前进入青铜器时代，三千多年前进入铁器时代，出现了农业文明，他们砍伐森林、种植稻麦、驯养猪狗，改造自然，进入农牧经济时代。18世纪，发明蒸汽机车、轮船、汽车、飞机，先进的人类追求奢侈的生活、贪婪地挖掘地球、疯狂地掠夺资源、严重地污染环境，美其名曰人类征服自然，而实际是破坏自然，从地区性的伤害发展到全球性的灾难，人类发现在无休止、不理智、不文明地追求享受的同时在给自己挖掘坟墓。

人类终于惊醒了，1987年世界环境及发展委员会发表的《布特兰报告书》确定人类应该保护环境、善待自然，提出了“可持续发展战略”，表达了人类应该清醒地、理智地、文明地处理好人与自然关系的大问题，指出“既满足当代人的需求，又不对后代人满足其需求的能力构成危害的发展”，称之为可持续发展。其核心思想是“人类应协调人口、资源、环境与发展之间的相互关系，在不损害他人和后代利益的前提下追求发展。”

这实际上是涉及到我们人类所赖以生存的地球如何既满足人类不断发展的需求，又不被破坏、不被毁灭这样的大问题；涉及到人口的不断增长、生活水平的不断提高、资源的不断消耗、环境的不断恶化；涉及矿产资源的不断耗竭、不可再生能源资源的不断耗费、水力资源的污染、土地资源的破坏、空气质量的不断恶化等重大问题。

在“可持续发展”战略中，材料是关键，材料是人类赖以生存和发展的物质基础，是人类社会进步的标志和里程碑，是社会不断进步的先导、是可持续发展的支柱。如果不断发现新矿藏，不断研究出新材料，不断延长材料的使用寿命，不断实施材料的再制造、再循环、再利用，那么这根支柱是牢靠的、坚强的、是能够维护人类可持续发展的！

在我国，已经积累了许许多多预防和控制材料提前失效（其因素主要是腐蚀、摩擦磨损磨蚀、疲劳与腐蚀疲劳）的理论、原则、技术和措施，需要汇总和提供应用，《材料延寿与可持续发展》丛书以多个专题力求解决这一课题项目。有一部分专题阐述了材料失效原理和过程，另一部分涉及工程领域，结合我国已积累的材料失

效的案例和经验，更深入系统地阐述预防和控制材料提前失效的理论、原则、技术和措施。丛书总编辑委员会前后花费五年的时间，将分散在全国各个研究院所、工厂、院校的研究成果经过精心分析研究、汇聚成一套系列丛书，这是一项研究成果、是一套高级科普丛书、是一套继续教育实用教材。希望对我国各个工业部门的设计、制造、使用、维护、维修和管理人员会有所启示、有所参考、有所贡献；希望对提高全民素质有所裨益、对国家各级公务员有所参考。

我国正处于高速发展阶段，制造业由大变强，材料的合理选择和使用，以达到装备的高精度、长寿命、低成本的目的，这一趋势应该受到广泛的关注。

中国科学院院士  
中国工程院院士

洪昌绪

# I 总前言 I

材料是人类赖以生存和发展的物质基础，是人类社会进步的标志和里程碑，是社会不断进步的先导，是国家实现可持续发展的支柱。然而，地球上的矿藏是有限的，而且需要投入大量的能源，进行复杂的提炼、处理，产生大量污染，才能生产成为人类有用的材料，所以，材料是宝贵的，需要科学利用和认真保护。

半个多世纪特别是改革开放三十多年来，我国材料的研究、开发、应用有了快速的发展，水泥、钢铁、有色金属、稀土材料、织物等许多材料的产量多年居世界第一。我国已经成为世界上材料的生产、销售和消费大国。“中国材料”伴随着“中国制造”的产品，遍布全球；伴随着“中国建造”的工程项目，遍布全国乃至世界上很多国家。材料支撑我国国民经济连续 30 多年 GDP 年均 10% 左右的高速发展，使我国成为全球第二大经济体。但是，我国还不是材料强国，还存在诸多问题需要改进。例如，在制造环境、运行环境和自然环境的作用下，出现过早腐蚀、老化、磨损、断裂（疲劳），材料及其制品在使用可靠性、安全性、经济性和耐久性（简称“四性”）方面都还有大量的工作要做。

“材料延寿”是指对材料及其制品在服役环境作用下出现腐蚀、老化、磨损和断裂而导致的过早失效进行预防与控制，以尽可能地提高其“四性”，也就是提高水平，提高质量，延长寿命。目标是节约资源、能源，减少对环境的污染，支持国家可持续发展。

材料及制品的“四性”实质上是材料及制品水平高低和质量好坏的最终表征和判断标准。追求“四性”，就是追求全寿命周期使用的高水平、高质量，追求“质量第一”，追求“质量立国”，追求“材料强国”、“制造强国”、“民富、国强、美丽国家”。

我国在“材料延寿与可持续发展”方面，做过大量的研究，取得了显著的成绩，积累了丰富的实践经验，凝练出了一系列在材料全寿命周期中提高“四性”的重要理论、原则、技术和措施，可以总结，服务于社会。

《材料延寿与可持续发展》丛书的目的就在于：总结过去，总结已有的系统控制材料提前损伤、破坏和失效的因素，即腐蚀、老化、磨损和断裂（主要是疲劳与腐蚀疲劳）的理论、原则、技术和措施，使各行业产品设计师，制造、使用和管理工程师有所启示、有所参考、有所作为、有所贡献，以尽可能地提高产品的“四性”，

延长使用寿命。丛书的目的还在于：面对未来、研究未来，推进材料的优质化、高性能化、高强度、长寿命化，多品质、多规格化、标准化，传统材料的综合优化，材料的不断创新，并为国家长远发展，提出成套成熟可靠的理论、原则、政策和建议，推进国家“节约资源、节能减排”、“可持续发展”和“保卫地球”、“科学、和谐”发展战略的实施，加速创建我国“材料强国”、“制造强国”。

在中国科协和中国工程院的领导与支持下，一批材料科学工作者不懈努力，不断地编写和出版系列图书。衷心希望通过我们的努力，既能对设计师，制造、使用和管理工程师“材料延寿与可持续发展”的创新有所帮助，又能为国家成功实施“可持续发展”、“材料强国”、“制造强国”的发展战略有所贡献。

中国工程院院士

中国工程院副院长



# I 前言 I

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心的话题。目前大力提倡的循环经济模式是追求更大经济效益、更少资源消耗、更低环境污染和更多劳动就业的一种先进经济模式。再制造作为我国新世纪重点发展起来的新方向,以节约资源、节省能源、保护环境为特色,是循环经济中“再利用”的高级形式。

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。

但是,在政府机关、科研院所、企业单位和社会公众中,仍有很多人对再制造不了解,简单地认为再制造就是“翻新”、“大修”的新名词,因此急需出版一本科普性和实用性兼备的书籍,介绍再制造的相关概念、特征和相关技术等。特别是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进行梳理,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,笔者作为国内再制造概念的提出者,我们充分利用所在单位在再制造技术研究及应用方面的优势,结合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,并以实际再制造生产中的实际技术与工艺应用过程为纲目,组织编写了本书。

全书由徐滨士院士指导编写并亲自执笔。全书共分上下两篇共11章,上篇阐述了再制造的概念及主要特征、再制造国内外发展现状及产业发展典型案例、再制造产业的技术体系及发展趋势;下篇阐述了再制造相关技术及其应用情况,具体内容包括再制造拆解技术、再制造清洗、再制造检测技术、再制造表面工程技术、再制造机械加工技术、再制造涂装和包装技术等。书中各章的执笔者是:第1章,史佩京;第2章,史佩京;第3章,李恩重;第4章,史佩京;第5章,王红美;第6章,汪勇、周新远;第7章,于鹤龙、宋占永;第8章,董世运、董丽虹;第9章,董世运、魏世丞、吕耀辉、陈永雄、胡振峰、王红美;第10章,姚巨坤;第11章,姚巨坤。全书由徐滨士、史佩京、李恩重统稿。

本书的出版将对于人们正确认识再制造、转变思想观念、增强节约意识、把握节约途径和构建循环经济具有重要意义,还对推动我国机电产品的再制造具有重要意义。

本书可供我国政府机关、工业企业从事设备管理的人员，以及机械工程、材料工程、环保工程等学科研究的科技人员阅读，也可供高等院校相关专业师生参阅。

特别感谢国家自然科学基金项目、国家 973 计划、国家科技支撑计划、国家质检公益项目的大力支持。本书还得到了军队预研项目、“2110 工程”重点建设学科的支持。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。

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

**编著者**  
**于北京**

# I 目录 I

## 上篇 再制造——战略型新兴产业

### 第1章 再制造概述

- 1.1 再制造的概念 /002
- 1.2 再制造与维修的区别 /003
- 1.3 再制造与绿色制造的联系 /004
- 1.4 再制造的特点 /004
- 参考文献 /005

### 第2章 国外再制造产业发展

- 2.1 国外再制造产业发展历程 /006
- 2.2 主要国家再制造产业发展特点 /008
- 2.3 一些发达国家在再制造产业方面取得的成就 /009
  - 2.3.1 美国 /009
  - 2.3.2 德国 /015
  - 2.3.3 日本 /016
- 2.4 国外再制造企业的模式与特点 /017
- 参考文献 /018

### 第3章 再制造产业在中国

- 3.1 中国再制造产业发展 /019
  - 3.1.1 再制造产业萌生阶段 /019
  - 3.1.2 学术研究、科学论证阶段 /019
  - 3.1.3 国家法律支持，政府全力推进阶段 /020
- 3.2 中国再制造政策 /022
  - 3.2.1 再制造相关的政策法规梳理 /022
  - 3.2.2 再制造相关的政策法规实施效果分析 /023
  - 3.2.3 再制造政策法规的特点 /024
- 参考文献 /026

### 第4章 再制造产业的技术体系发展

- 4.1 再制造技术体系 /027

4.2 再制造技术重点发展方向 /028

4.3 再制造技术发展趋势 /029

参考文献 /030

## 第5章 再制造产业典型发展实例

5.1 汽车零部件再制造试点企业开展再制造的情况 /031

5.2 非试点企业和其他类型企业再制造情况 /032

5.3 中国再制造技术及产业发展的重点领域 /033

参考文献 /038

## 下篇 再制造实用技术

## 第6章 再制造实用拆解技术

6.1 基本概念与主要特征 /040

6.1.1 再制造拆解基本概念 /040

6.1.2 再制造拆解特点 /040

6.1.3 再制造拆解技术发展趋势 /041

6.2 再制造实用拆解技术 /042

6.2.1 再制造拆解分类 /042

6.2.2 再制造拆解的要求及规则 /043

6.2.3 再制造拆解技术方法 /045

6.2.4 典型连接件的拆解 /048

6.3 废旧发动机再制造拆解技术应用 /050

参考文献 /052

## 第7章 再制造实用清洗技术

7.1 概念与特征 /053

7.1.1 基本概念 /053

7.1.2 再制造清洗影响因素 /054

7.1.3 再制造清洗的基本要素 /055

7.1.4 再制造清洗阶段及要求 /055

7.1.5 再制造清洗内容 /056

7.2 再制造实用清洗技术 /058

7.2.1 物理法再制造清洗技术 /058

7.2.2 化学法再制造清洗技术 /064

7.2.3 先进再制造清洗技术及发展趋势 /072

7.3 典型零部件再制造清洗技术应用 /073

- 7.3.1 发动机缸体的清洗流程 /073
- 7.3.2 发动机缸盖清洗流程 /074
- 7.3.3 发动机油底壳的清洗流程 /075

参考文献 /075

## 第8章 再制造实用检测技术

- 8.1 概念与特征 /076
  - 8.1.1 基本概念 /076
  - 8.1.2 再制造毛坯检测的内容 /077
  - 8.1.3 机械零部件的失效形式分析 /078
- 8.2 废旧毛坯件检测方法 /079
  - 8.2.1 感官检测法 /079
  - 8.2.2 测量工具检测法 /080
  - 8.2.3 无损检测法 /081
- 8.3 零部件再制造质量检测技术 /081
  - 8.3.1 零件几何参数检测技术 /081
  - 8.3.2 零件性能检测 /084
- 8.4 再制造零件无损检测技术 /087
  - 8.4.1 无损检测技术概述 /087
  - 8.4.2 渗透检测技术 /088
  - 8.4.3 磁粉检测技术 /089
  - 8.4.4 超声波检测技术 /091
  - 8.4.5 涡流检测技术 /093
  - 8.4.6 磁记忆检测技术 /094
  - 8.4.7 射线检测技术 /096

8.5 典型件再制造检测应用 /096

参考文献 /098

## 第9章 再制造表面工程技术

- 9.1 概念与特征 /099
  - 9.1.1 再制造加工的概念 /099
  - 9.1.2 再制造加工方法分类与选择 /100
  - 9.1.3 再制造表面工程技术的应用 /101
- 9.2 表面镀层再制造技术 /101
  - 9.2.1 电镀技术 /101
  - 9.2.2 化学镀技术 /103
  - 9.2.3 电刷镀技术 /104

- 9.2.4 纳米复合电刷镀技术 /106
- 9.3 表面涂层再制造技术 /108
  - 9.3.1 热喷涂技术基础 /108
  - 9.3.2 高速电弧喷涂技术 /110
  - 9.3.3 氧-乙炔火焰喷涂技术 /112
  - 9.3.4 微纳米超声速等离子喷涂技术 /113
  - 9.3.5 表面粘涂技术 /114
- 9.4 表面覆层再制造技术 /116
  - 9.4.1 焊接技术 /116
  - 9.4.2 微脉冲冷焊技术 /122
  - 9.4.3 激光再制造技术 /125
  - 9.4.4 氧-乙炔火焰粉末喷熔技术 /127
- 9.5 表面改性再制造技术 /128
  - 9.5.1 表面强化技术 /128
  - 9.5.2 离子注入技术 /130
  - 9.5.3 低温离子渗硫技术 /132
- 9.6 零件表面再制造技术的应用 /133
  - 9.6.1 曲轴的再制造恢复 /133
  - 9.6.2 气缸体主轴承孔的再制造 /136
  - 9.6.3 舰船钢板的再制造延寿 /137
  - 9.6.4 大型发酵罐的再制造延寿 /140
  - 9.6.5 发动机凸轮轴轴颈的再制造 /141
  - 9.6.6 典型零件的激光再制造 /142
- 参考文献 /145

## 第10章 再制造机械加工技术

- 10.1 再制造机械加工特点及作用 /146
  - 10.1.1 机械加工的特点 /146
  - 10.1.2 机械加工在再制造中的作用 /146
- 10.2 失效件常用再制造机械加工方法 /147
- 10.3 零件表面再制造涂层的机械加工技术 /148
  - 10.3.1 再制造涂层切削加工的特点 /149
  - 10.3.2 再制造涂层的车削加工 /149
  - 10.3.3 再制造涂层的磨削加工 /154
  - 10.3.4 再制造涂层的特种加工技术 /155
- 10.4 典型废旧件再制造机械加工工艺 /157
  - 10.4.1 发动机缸体与缸盖的再制造加工工艺 /157

10.4.2 曲轴再制造加工工艺 /159

10.4.3 连杆再制造加工工艺 /161

参考文献 /162

## 第 11 章 再制造产品涂装和包装

11.1 再制造涂装技术 /163

11.1.1 基本概念 /163

11.1.2 涂装工具设备 /164

11.1.3 涂装工艺 /164

11.2 再制造产品包装技术与工艺 /166

11.2.1 定义及分类 /166

11.2.2 产品包装材料及容器 /167

11.2.3 再制造产品包装技术 /167

11.2.4 再制造产品的绿色包装 /169

11.2.5 再制造产品质保附件 /170

参考文献 /171

索引 /172

# 上篇 再制造—— 战略型新兴产业