

丛书序一

深入推进固废资源化、大力发展循环经济已经成为支撑社会经济绿色发展、战略资源可持续供给和“双碳”目标实现的重要途径，是解决我国资源环境生态问题的基础之策，也是一项利国利民、功在千秋的伟大事业。党和政府历来高度重视固废循环利用与污染控制工作，习近平总书记多次就发展循环经济、推进固废处置利用做出重要批示；《2030年前碳达峰行动方案》明确深入开展“循环经济助力降碳行动”，要求加强大宗固废综合利用、健全资源循环利用体系、大力推进生活垃圾减量化资源化；党的二十大报告指出“实施全面节约战略，推进各类资源节约集约利用，加快构建废弃物循环利用体系”。

回顾二十多年来我国循环经济的快速发展，总体水平和产业规模已取得长足进步，如：2020年主要资源产出率比2015年提高了约26%、大宗固废综合利用率达56%、农作物秸秆综合利用率达86%以上；再生资源利用能力显著增强，再生有色金属占国内10种有色金属总产量的23.5%；资源循环利用产业产值达到3万亿元/年等，已初步形成以政府引导、市场主导、科技支撑、社会参与为运行机制的特色发展之路。尤其是在科学技术部、国家自然科学基金委员会等长期支持下，我国先后部署了“废物资源化科技工程”、国家重点研发计划“固废资源化”重点专项以及若干基础研究方向任务，有力提升了我国固废资源化领域的基础理论水平与关键技术装备能力，对固废源头减量—智能分选—高效转化—清洁利用—精深加工—精准管控等全链条创新发展发挥了重要支撑作用。

随着全球绿色低碳发展浪潮深入推进，以欧盟、日本为代表的发达国家和地区已开始部署新一轮循环经济行动计划，拟通过数字、生物、能源、材料等前沿技术深度融合以及知识产权与标准体系重构，以保持其全球绿色竞争力。为了更好地发挥“固废资源化”重点专项成果的引领和应用效能，持续赋能循环经济高质量发展和高水平创新人才培养等方面工作，科学出版社依托该专项组织策划了“固废资源化技术丛书”，来自中国科学院过程工程研究所、五矿集团、矿冶科技集团有限公司、同济大学、北京工业大学等单位的行业专家、重点专项项目及课题负责人参加了丛书的编撰工作。丛书将深刻把握循环经济领域国内外学术前沿动态，系统提炼“固废资源化”重点专项研发成果，充分展示和深入分析典型无

机固废源头减量与综合利用、有机固废高效转化与安全处置、多元复合固废智能拆解与清洁再生等方面的基础理论、关键技术、核心装备的最新进展和示范应用，以期让相关领域广大科研工作者、企业家群体、政府及行业管理部门更好地了解固废资源化科技进步和产业应用情况，为他们开展更高水平的科技创新、工程应用和管理工作提供更多有益的借鉴和参考。

左铁镛

中国工程院院士

2023年2月

丛书序二

我国处于绿色低碳循环发展关键转型时期。化工、冶金、能源等行业仍将长期占据我国工业主体地位，但其生产过程产生数十亿吨级的固体废物，造成的资源、环境、生态问题十分突出，是国家生态文明建设关注的重大问题。同时，社会消费环节每年产生的废旧物质快速增加，这些废旧物质蕴含着宝贵的可回收资源，其循环利用更是国家重大需求。固废资源化通过再次加工处理，将固体废物转变为可以再次利用的二次资源或再生产品，不但可以解决固体废物环境污染问题，而且实现宝贵资源的循环利用，对于保证我国环境安全、资源安全非常重要。

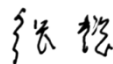
固废资源化的关键是科技创新。“十三五”期间，科学技术部启动了“固废资源化”重点专项，从化工冶金清洁生产、工业固废增值利用、城市矿产高质循环、综合解决集成示范等全链条、多层面、系统化加强了相关研发部署。经过三年攻关，取得了一系列基础理论、关键技术和工程转化的重要成果，生态和经济效益显著，产生了巨大的社会影响。依托“固废资源化”重点专项，科学出版社组织策划了“固废资源化技术丛书”，来自中国科学院过程工程研究所、中国地质大学（北京）、中国矿业大学（北京）、中南大学、东北大学、矿冶科技集团有限公司、军事科学院国防科技创新研究院等很多单位的重点专项项目负责人都参加了丛书的编撰工作，他们都是固废资源化各领域的领军人才。丛书对固废资源化利用的前沿发展以及关键技术进行了阐述，介绍了一系列创新性强、智能化程度高、工程应用广泛的科技成果，反映了当前固废资源化的最新科研成果和生产技术水平，有助于读者了解最新的固废资源化利用相关理论、技术和装备，对学术研究和工程化实施均有指导意义。

我带领团队从1990年开始，在国内率先开展了清洁生产与循环经济领域的技术创新工作，到现在已经30余年，取得了一定的创新性成果。要特别感谢科学技术部、国家自然科学基金委员会、中国科学院等的国家项目的支持，以及社会、企业等各方面的大力支持。在这个过程中，团队培养、涌现了一批优秀的中青年骨干。丛书的主编李会泉研究员在我团队学习、工作多年，是我们团队的学术带头人，他提出的固废矿相温和重构与高质利用学术思想及关键技术已经得到了重要工程应用，一定会把这套丛书的组织编写工作做好。

固废资源化利国利民，技术创新永无止境。希望参加这套丛书编撰的专家、

学者能够潜心治学、不断创新，将理论研究和工程应用紧密结合，奉献出精品工程，为我国固废资源化科技事业做出贡献；更希望在这个过程中培养一批年轻人，让他们多挑重担，在工作中快速成长，早日成为栋梁之材。

感谢大家的长期支持。



中国工程院院士

2022年12月

丛书前言

深入推进固废资源化已成为大力发展循环经济，建立健全绿色低碳循环发展经济体系的重要抓手。党的二十大报告指出“实施全面节约战略，推进各类资源节约集约利用，加快构建废弃物循环利用体系”。我国固体废物增量和存量常年位居世界首位，成分复杂且有害介质多，长期堆存和粗放利用极易造成严重的水-土-气复合污染，经济和环境负担沉重，生态与健康风险显现。而另一方面，固体废物又蕴含着丰富的可回收物质，如不加以合理利用，将直接造成大量有价资源、能源的严重浪费。

通过固废资源化，将各类固体废物中高品位的钢铁与铜、铝、金、银等有色金属，以及橡胶、尼龙、塑料等高分子材料和生物质资源加以合理利用，不仅有利于解决固体废物的污染问题，也可成为有效缓解我国战略资源短缺的重要突破口。与此同时，由于再生资源的替代作用，还能有效降低原生资源开采引发的生态破坏与环境污染问题，具有显著的节能减排效应，成为减污降碳协同增效的重要途径。由此可见，固废资源化对构建覆盖全社会的资源循环利用体系，系统解决我国固废污染问题、破解资源环境约束和推动产业绿色低碳转型具有重大的战略意义和现实价值。随着新时期绿色低碳、高质量发展目标对固废资源化提出更高要求，科技创新越发成为其进一步提质增效的核心驱动力。加快固废资源化科技创新和应用推广，就是要通过科技的力量“化腐朽为神奇”，将“绿水青山就是金山银山”的理念落到实处，协同推进降碳、减污、扩绿、增长。

“十三五”期间，科学技术部启动了国家重点研发计划“固废资源化”重点专项，该专项紧密面向解决固体废物重大环境问题、缓解重大战略资源紧缺、提升循环利用产业装备水平、支撑国家重大工程建设等方面战略需求，聚焦工业固废、生活垃圾、再生资源三大类典型固废，从源头减量、循环利用、协同处置、精准管控、集成示范等方面部署研发任务，通过全链条科技创新与全景式任务布局，引领我国固废资源化科技支撑能力的全面升级。自专项启动以来，已在工业固废建工建材利用与安全处置、生活垃圾收集转运与高效处理、废旧复合器件智能拆解高值利用等方面取得了一批重大关键技术突破，部分成果达到同领域国际先进水平，初步形成了以固废资源化为核心的技术装备创新体系，支撑了近 20 亿吨工业固废、城市矿产等重点品种固体废物循环利用，再生有色金属占比达到 30%，

为破解固废污染问题、缓解战略资源紧缺和促进重点区域与行业绿色低碳发展发挥了重要作用。

本丛书将紧密结合“固废资源化”重点专项最新科技成果，集合工业固废、城市矿产、危险废物等领域的前沿基础理论、创新技术、产品案例和工程实践，旨在解决工业固废综合利用、城市矿产高值再生、危险废物安全处置等系列固废处理重大难题，促进固废资源化科技成果的转化应用，支撑固废资源化行业知识普及和人才培养。并以此为契机，期寄固废资源化科技事业能够在各位同仁的共同努力下，持续产出更加丰硕的研发和应用成果，为深入推动循环经济升级发展、协同推进减污降碳和实现“双碳”目标贡献更多的智慧和力量。

李会泉 何发钰 戴晓虎 吴玉锋

2023年2月

序

制造业贯穿了人类进化的整个过程，从早期的简单工具制作到现代高科技生产，它一直是推动人类社会进步的关键力量，是现代工业、农业、国防、科技以及服务业等的基石。制造业不仅促进了经济发展和技术进步，还深刻影响了社会结构、生活方式和文化交流。在未来，制造业将继续在创新和可持续发展中发挥重要作用，推动人类迈向新的高度。

近年来，中国制造业在经济发展的推动下取得了显著成就，成为全球制造业的重要基地。这一发展在促进经济增长、提高就业率、增强国家竞争力方面发挥了关键作用。然而，伴随着制造业的快速发展，资源浪费与能源消耗过大的问题也日益凸显，成为影响可持续发展的重要因素。面对这一挑战，发展先进绿色再制造技术成为推动制造业转型升级、促进循环经济发展的关键路径之一。

再制造作为循环经济中“减量化、再循环、再利用”三个核心原则的实践途径之一，是深入贯彻习近平总书记所倡导的绿色发展理念的关键环节。这一过程涉及将已达到使用寿命或因故障而暂时停止运作的零部件，通过应用先进的高科技手段、新材料等关键技术创新，对其进行修复与重新制造，从而恢复其原有性能与功能，确保再制造产品的质量与原型新品保持一致甚至更高标准。这一创新性策略不仅有效节约了资源，减少了废弃物的产生，同时也显著降低了能源消耗，对于促进经济社会的绿色发展和可持续发展具有深远意义。

2024年3月，国务院发布了《推动大规模设备更新和消费品以旧换新行动方案》（以下简称《方案》）。该方案秉持市场主导与政府引导相结合的原则，通过鼓励先进技术和淘汰落后产能，注重标准化引领与有序提升，全面实施设备更新、消费品以旧换新、回收循环利用与标准升级四大行动计划。这一举措旨在加速推动经济向绿色、可持续发展方向转型，提升资源利用效率，减少环境污染，同时促进消费结构的优化升级，激发市场活力。通过《方案》的实施，旨在构建一个健康、绿色的经济发展模式，实现经济效益、社会效益与环境保护的和谐共存。

近年来，随着大批量重型装备关键部件陆续达到其使用寿命的极限，频繁的零部件更换不仅显著增加了生产成本，而且与追求可持续发展的目标背道而驰。因此，废旧重型装备损伤检测与再制造形性调控理论及技术应运而生，并迅速得到了普及和应用。再制造技术深刻体现了《方案》的精神内涵，契合了国家推进循环经济发展的战略方向。同时，作为国家重点培育的战略性新兴产业，再制造

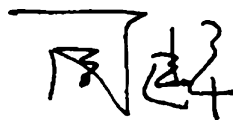
技术获得了政府及企业的高度关注和大力支持，在材料科学、机械工程等领域的研究者中以及重型装备企业中备受推崇。

《重型装备高值关键件再制造技术与应用》一书详尽介绍了废旧重型装备关键部件的失效模式及其再制造的基础理论与核心技术，聚焦于掘进、冶金、海洋等行业废旧重型装备的分级循环使用，全面论述了再制造所需的专用材料、加工工艺、检测手段和评估体系等多个重要问题，内容横跨材料学、力学、物理学、化学、机械工程和管理学等多个学科。撰写此类专业著作的一大挑战是既要深入阐述再制造技术细节，同时还要确保来自不同专业领域的读者能够全面理解再制造的概念。该书在这两方面均作出了成功的尝试和突破。

该书的作者群体在再制造技术领域耕耘多年，积累了丰富的科研经验，他们分别来自国内在再制造技术研究方面具有标杆性的高等学府、科研机构以及高新技术领先企业。该书系统地勾勒了再制造技术的内涵及其发展脉络，深入剖析了废旧重型装备关键部件的现状及其失效损伤机理，详细介绍了适用于工程化应用的再制造材料、核心技术及评估方法。该书汇集了各参编单位的集体智慧，成功实现了产业、学术、研究与实际应用的有机融合，相信可以使读者对废旧重型装备的再制造技术及其深远意义有一个更加深入和全面的认识。

该书内容新颖、覆盖面广，有助于推动废旧重型装备的有序梯次循环利用。当然，再制造技术的相关研究与应用正处于快速演进之中，未来的发展潜力与空间巨大。期望该书的出版能够在废旧设备的更新换代与高效循环利用方面发挥更加显著的作用，并促进该项技术的不断创新和进步。

是为序。



2024年8月30日

前言

制造业是衡量国家综合国力的重要核心指标之一。面对当前第四次工业革命的汹涌浪潮，全球各国纷纷推出旨在振兴制造业的战略举措，如美国的“国家制造业创新网络”、德国的“工业 4.0”、日本的“工业价值链”等。我国提出了智能制造强国战略，为推动制造业可持续发展注入了新的活力。新技术、新业态、新模式、新产业的蓬勃兴起，对工程科技人才提出了更为严峻的挑战。在这一背景下，加快推动工程成果的转化进程显得尤为迫切。再制造技术作为方兴未艾的新兴产业，正日益受到社会各界的广泛关注。为深化再制造领域的理论研究和工程应用，我们集结了来自相关高校、科研院所及企业的专家组成撰写团队，在梳理和总结各单位近年来的研究成果基础上，广泛汲取和整合了国内外再制造相关领域的先进成果与经验，经过精心策划与不懈努力，终于完成了本书的撰写工作。

本书以详尽而全面的视角，深刻阐述了再制造的理念及其未来走向，着重探讨了废旧重型设备在其生命周期中，通过应用先进的材料科学、工程技术以及科学的管理策略，赋予其全新的生命，显著提升了资源的循环利用效率，促进了企业的经济收益与社会价值的双重增长。

全书共 7 章。第 1 章介绍再制造的内涵，分析再制造与全生命周期理论、循环经济的相关性，介绍智能再制造体系以及再制造在政策支持下的发展趋势，主要由梁秀兵、张志彬、刘渤海、井致远、杜晓坤撰写。第 2 章介绍掘进、冶金、海洋钻采、海洋船舶行业重型装备的基本情况，以及其表面损伤失效形式和传统修复方法，主要由程永亮、黄东保、谭帅、邹大程撰写。第 3 章介绍面向严苛环境的再制造专用粉体材料的内涵和制备方法，以及对粉体材料的发展趋势进行了展望，主要由杜令忠、胡振峰、仝永刚、兰昊、孙小明撰写。第 4 章介绍废旧重型装备高值关键件绿色激光清洗的基本机理，详述激光清洗技术平台搭建、试验验证和评价情况，主要由夏清华、孔令超、杨金堂、曹成铭、周诗洋撰写。第 5 章介绍再制造成形技术的基本原理，重点阐述纳米电刷镀技术、低温高速火焰喷涂技术、环形激光高效熔覆技术设备核心组件的设计与验证，主要由梁秀兵、陈永雄、程延海、张志彬、王荣、吕镖撰写。第 6 章介绍严苛环境下常用在役设备损伤检测技术和基于数据挖掘的损伤识别技术，阐述新兴太赫兹时域光谱检测技术及其试验验证情况，主要由张显程、梅勇兵、胡明慧、贾九红、方金祥、王孝然撰写。第 7 章介绍再制造重型装备质量评价体系和“创新型”再制造商业推广

模式的建立情况，以及成功的废旧重型装备典型高值关键件再制造应用案例，主要由刘增华、吴莎、鲁凯举、刘渤海、田富强、李建芳、朱长江、潜凌撰写。全书由张志彬统稿，梁秀兵审稿并定稿。研究生李旭、袁嘉驰、吴宇翔、王开心、宋培松等为本书资料的收集以及整理做了大量的工作。

本书的研究成果得到了国家重点研发计划“固废资源化”重点专项“废旧重型装备损伤检测与再制造形性调控技术”项目（编号：2018YFC1902400）、国家自然科学基金面上项目“超音速火焰喷涂高熵非晶涂层结构演变及其腐蚀磨损行为研究”（编号：52275225），以及军队科研项目等的大力支持，并得益于国内众多高新技术企业和高等院校等合作伙伴的鼎力相助。中国载人航天工程总设计师、中国工程院院士周建平研究员为本书赐序，对书稿进行了细致严谨的审阅，并提出了诸多宝贵的改进建议。在此，我们亦向本书中参考文献相关作者致以感谢。

废旧重型装备再制造技术是战略性新兴产业的重要组成部分，其相关理论与技术处于快速更新迭代过程中。鉴于作者学术能力有限，书中恐有疏漏与不足，敬请读者批评指正。

作 者

2024年8月1日

目 录

丛书序一
丛书序二
丛书前言
序
前言

第 1 章 绪论	1
1.1 再制造概述	2
1.1.1 再制造	2
1.1.2 再制造与全生命周期理论	3
1.2 再制造的发展趋势	4
1.2.1 再制造与循环经济	4
1.2.2 智能再制造体系	6
1.2.3 再制造的政策支持及发展趋势	8
参考文献	11
第 2 章 重型装备典型高值关键件	12
2.1 掘进行业重型装备及其典型高值关键件	12
2.1.1 掘进行业重型装备	12
2.1.2 掘进机刀盘	15
2.1.3 掘进机主轴承	18
2.2 冶金行业重型装备及其典型高值关键件	22
2.2.1 冶金行业重型装备	22
2.2.2 中宽厚板主传动万向轴	23
2.2.3 热轧卷取机卷筒	26
2.3 海洋钻采行业重型装备及其典型高值关键件	28
2.3.1 海洋钻采行业重型装备	28
2.3.2 HY90DB 绞车	31
2.3.3 TC675 天车	33
2.4 海洋船舶行业重型装备及其典型高值关键件	34

2.4.1	海洋船舶行业重型装备	34
2.4.2	船用柴油机曲轴	35
2.4.3	船用推进轴	37
	参考文献	39
第3章	面向严苛服役环境的再制造专用粉体材料	40
3.1	再制造专用粉体材料	40
3.2	再制造专用粉体材料的性能要求	41
3.3	再制造专用粉体材料制备方法	43
3.3.1	机械粉碎法	43
3.3.2	雾化制粉法	44
3.3.3	固相合成法	48
3.3.4	液相合成法	51
3.3.5	气相合成法	55
3.3.6	包覆法	55
3.4	面向重型装备的再制造专用材料	56
3.4.1	金属基/陶瓷增强相复合材料的高通量制备与表征	56
3.4.2	金属基/陶瓷增强相复合材料的性能研究	57
3.4.3	面向关键件服役要求的再制造专用材料筛选	65
3.5	再制造专用材料的发展趋势	66
	参考文献	67
第4章	废旧重型装备高值关键件绿色激光清洗技术	68
4.1	严苛环境下典型厚污染物的绿色表面清洗机理	68
4.1.1	激光清洗的物理去除模型	68
4.1.2	烧蚀去除机理	77
4.1.3	热应力去除机理	84
4.2	自动化绿色激光清洗平台及控制搭建	88
4.2.1	大型冶金轴件激光清洗装备	88
4.2.2	基于3D视觉的清洗工艺跟踪反馈模型	92
4.3	智能成套激光清洗装备研制及可靠性验证	99
4.3.1	成套清洗设备的参数设计	99
4.3.2	整机开发及可靠性验证	111
4.4	绿色表面清洗质量与效果评价	113
4.4.1	清洗质量评价软件设计	113
4.4.2	软件验证	118
	参考文献	119

第 5 章 再制造成形关键技术及装备	121
5.1 纳米电刷镀技术	121
5.1.1 纳米电刷镀笔设计与开发	121
5.1.2 新型镀笔设计方案	123
5.1.3 电化学微增材再制造工艺设计	125
5.2 热喷涂技术	126
5.2.1 低温高速火焰喷涂技术	126
5.2.2 工艺参数对火焰束流的影响	128
5.2.3 低温高速火焰喷涂非晶纳米晶涂层特征分析	131
5.3 激光熔覆技术	137
5.3.1 激光熔覆技术的基本原理和工作过程	137
5.3.2 环形激光熔覆加工头设计开发	138
参考文献	142
第 6 章 严苛环境下重型装备损伤检测与评价技术	143
6.1 常用在役设备损伤检测技术	143
6.1.1 涡流检测技术	143
6.1.2 微米压入技术	147
6.1.3 超声波导杆损伤识别系统研究	160
6.1.4 深层阵列涡流裂纹检测技术	163
6.2 基于数据挖掘的损伤识别技术	171
6.2.1 特征提取算法介绍	171
6.2.2 机器学习算法介绍	174
6.2.3 模型训练与结果比较	177
6.2.4 超参数寻优	178
6.3 新兴损伤检测技术及其试验验证	180
6.3.1 太赫兹检测技术	180
6.3.2 太赫兹时域光谱技术的缺陷检测与成像	183
6.3.3 太赫兹时域光谱技术的损伤评价验证	188
参考文献	190
第 7 章 再制造产品质量评价、推广模式及应用案例	200
7.1 再制造产品质量评价指标体系的确立	200
7.1.1 原则及构建过程	200
7.1.2 单一指标公式设计	201
7.1.3 质量可靠性指标	203
7.1.4 再制造技术指标	205

7.1.5	环境效益指标·····	207
7.1.6	经济效益指标·····	209
7.2	再制造产品质量评价流程·····	211
7.2.1	综合评价模型结构·····	211
7.2.2	评价对象分析·····	212
7.3	基于模糊综合评价法的再制造产品质量评价体系构建·····	215
7.3.1	常规综合评价法与赋权法·····	215
7.3.2	评价算法模型·····	216
7.3.3	模糊综合评价法·····	218
7.3.4	改进层次分析法·····	220
7.4	“创新型”再制造商业推广模式的建立·····	223
7.4.1	“创新型”再制造商业化推广模式的构建·····	223
7.4.2	“创新型”再制造商业化推广模式的实施·····	229
7.5	再制造应用案例·····	237
7.5.1	掘进装备再制造应用案例·····	237
7.5.2	冶金装备再制造应用案例·····	241
7.5.3	海洋装备再制造应用案例·····	242
	参考文献·····	242

第 1 章

绪 论

在过去的一个世纪里，人类社会的物质财富积累达到了前所未有的高度。这一成就的取得，很大程度上得益于科技的飞速进步和工业化的广泛推广。然而，这种高速的经济发展模式也带来了一系列严峻的环境和资源问题。制造业作为现代经济的核心支柱，不仅消耗了大量的自然资源，而且产生了大量的废弃物，其中包括 55 亿吨的无害废弃物和 7 亿吨的有害废弃物。这些废弃物的排放量占据了全球污染总量的 70% 以上。这种对资源的过度开采和对环境的破坏，已经使得人类的发展模式与地球的自然承载能力之间出现了不可忽视的矛盾，并对全球的可持续发展构成了严重的威胁。

循环经济是一种全新的经济增长模式。它强调在经济活动中最大限度地减少资源的输入和废弃物的输出，并通过遵循“减量化（reduce）、再制造（remanufacture）、再利用（reuse）、再循环（recycle）”的原则，以实现资源的闭环流动和高效利用。这种模式不仅关注经济效益，更强调生态效益和社会效益的统一，旨在通过技术创新和管理创新，推动经济系统与自然生态系统的和谐共生^[1, 2]。

再制造作为循环经济的一个重要组成部分，涉及对旧产品的回收、检测、修复和再利用。再制造的过程包括对旧产品的拆解，对可修复部件的清洗、修复和更换，以及对修复后的部件进行性能测试，确保其达到甚至超过原有产品的性能标准。通过这一过程，不仅能够有效地延长产品的使用寿命，节约大量的原材料和能源，还能够减少二氧化碳等温室气体的排放，从而实现“双碳”目标的双重效益。推动再制造工程的发展，对于构建资源节约型和环境友好型社会具有重要意义。循环经济和再制造不仅有助于实现经济的可持续发展，还有助于保护和改善人类的生存环境。随着技术的进步和社会意识的提高，循环经济和再制造将在全球范围内得到更广泛的应用和推广，为构建绿色、低碳、循环、可持续的全球经济体系做出重要贡献。通过促进再制造的发展，我们能够有效应对资源的有限性和环境问题，实现经济增长与环境保护的有机结合，推动全球向更加可持续的发展路径转型。

1.1 再制造概述

1.1.1 再制造

1. 再制造的含义

再制造作为一种循环经济模式，正在受到越来越多人的关注和重视。中国国家标准《再制造 术语》(GB/T 28619—2012)对再制造作出了如下定义：对再制造毛坯进行专业化修复或升级改造，使其质量特性不低于原型新品水平的过程。再制造是一个系统化的过程，它包括收集使用过的产品、彻底拆解、详细检测与评估、彻底清洁与必要的表面处理、修复或更换关键部件、重新组装、严格测试以及提供质量保证等环节。这个过程旨在将旧产品恢复到与新产品相媲美甚至更优的性能水平，同时实现资源的高效循环利用和环境保护。再制造不仅关注产品的功能恢复，更注重性能的提升和质量的保证，确保再制造的产品能够满足现代市场的需求，并为消费者提供性价比高的选择。

2. 再制造与维修、翻新的区别

再制造、维修和翻新是处理旧产品的不同方法，它们在目的、深度和结果上有所区别。再制造是一个深入的过程，涉及对产品进行彻底的拆解、检测、修复和升级，目标是使产品性能恢复到甚至超过原始设计标准，提供与新产品相媲美的质量和性能，并通常伴随有质量保证。维修通常是对产品进行局部修复或更换损坏部件，以恢复其基本功能，但不一定能达到原始性能水平，且通常不涉及对整个产品的全面升级。翻新则介于两者之间，它可能包括对产品外观和一些关键部件的修复和更换，以改善其外观和提高部分性能，但通常不涉及对产品进行全面的性能提升和质量保证。简而言之，再制造追求的是性能和质量的全面恢复和提升，维修关注的是功能恢复，而翻新则侧重于外观和部分性能的提升。

3. 再制造技术及其运作模式

再制造技术是一种高度专业化和系统化的工程方法，它通过一系列精密的技术手段和工程流程，使旧产品焕发新生，达到节能减排和资源循环利用的目的。再制造技术涵盖了拆解、检测、清洗、表面处理、修复、部件更换、重新组装和质量测试等多个环节。每个环节都有其独特的技术方法和应用场景，确保旧产品

能够恢复到甚至超过原始性能和质量标准。这些技术方法的综合应用,不仅实现了资源的高效循环利用和环境保护,还为市场提供了高性价比的产品,推动了可持续发展。再制造技术的不断发展和创新,必将进一步提升其在各个行业中的应用价值和影响力。

再制造的运作模式是多样化的,它们根据不同的行业需求、产品特性和市场环境而设计,旨在实现资源的高效利用和环境的可持续发展。再制造的运作模式主要包括原厂再制造、第三方再制造、用户再制造和网络平台再制造等。每种模式都有其独特的特点和优势,同时也面临着不同的挑战和机遇。

再制造作为一种绿色、高效的工程方法,不仅能够实现资源的高效利用和环境的可持续发展,还能够为社会带来经济效益和社会效益,具有广阔的应用前景和重要的战略意义。

1.1.2 再制造与全生命周期理论

再制造是一种在全生命周期理论(life cycle theory, LCT)框架下实现资源循环利用和环境保护的关键策略。全生命周期理论注重产品从设计、生产、使用直到报废的整个生命周期管理,而再制造则是这一过程中至关重要的环节,特别是在产品的退役阶段,通过对退役产品进行修复、更新或重新制造,使其重新获得使用价值,从而延长产品的生命周期,减少资源消耗和环境负担。

全生命周期理论强调产品生命周期的各个阶段,包括设计、制造、使用、维护和报废,每一个阶段都需要综合考虑经济效益、环境影响和社会责任。

在设计阶段,企业需要采用生态设计理念,确保产品在整个生命周期内的资源利用效率最大化,环境影响最小化。再制造理念在这一阶段就要被纳入考虑,通过设计可拆卸、易修复和模块化的产品,为后续的再制造过程打下基础。

在制造和使用阶段,全生命周期理论要求企业不断优化生产工艺和资源管理,减少废料和污染物的产生,同时提高产品的耐用性和维修性。再制造在这一过程中起到了关键作用,通过对使用中的产品进行维护和更新,确保其性能和可靠性,延长其使用寿命。这不仅降低了新产品的需求,减少了原材料和能源的消耗,还有效减少了废旧产品对环境的影响。

当产品进入报废阶段,再制造就成为全生命周期管理中的重要一环。传统的废旧产品处理方式通常包括填埋和焚烧,这不仅浪费了大量的可再利用资源,还对环境造成严重污染。再制造通过对退役产品进行拆解、清洗、检测和修复,将其恢复到原有的性能水平,甚至是升级改造,使得这些产品可以重新投放市场,继续发挥其使用价值。这一过程中,企业不仅可以节约大量的原材料和生产成本,还能够减少废弃物的产生以及减少对环境的污染。

再制造与全生命周期理论的结合,不仅在环境保护方面具有显著优势,还在经济和社会效益方面展现了巨大潜力。再制造过程可使资源得到节约,成本得到降低,从而使得企业能够在激烈的市场竞争中保持成本优势,提高盈利能力。同时,再制造产业的发展也创造了大量的就业机会,促进了循环经济的发展,为社会的可持续发展作出了重要贡献。

1.2 再制造的发展趋势

1.2.1 再制造与循环经济

循环经济是一种强调物质循环利用和高效利用的经济发展模式,其核心理念是通过资源的有效循环来降低环境负担,实现经济的可持续发展。从资源流程和经济增长对资源、环境影响的角度来看,经济增长方式存在两种模式:一种是传统增长模式,即“资源—产品—废弃物”的单向式直线过程,这种模式意味着创造的财富越多,消耗的资源就越多,产生的废弃物也就越多,对资源环境的负面影响就越大;另一种是循环经济模式,即“资源—产品—废弃物—再生资源”的反馈式循环过程,这种模式可以更有效地利用资源和保护环境,以尽可能小的资源消耗和环境成本,获得尽可能大的经济效益和社会效益,从而使经济系统与自然生态系统的物质循环过程相互和谐,促进资源永续利用。

因此,循环经济是一种以资源的高效利用和循环利用为核心的经济增长模式,以“减量化、再利用、再制造、再循环”为原则,以“低消耗、低排放、高效率”为基本特征,既符合可持续发展理念,也是对“大量生产、大量消费、大量废弃”的传统经济模式的一次根本变革。

从广义的物资循环利用角度出发,再制造既可以划归为再利用,也可以划归为资源化。根据循环利用过程中节能、节材和保护环境的效益,再制造通常被划归为再利用的范畴。再制造是以废旧机电产品为对象,在保持零部件材质和形状基本不变的前提下,运用高技术进行修复,以及新的科技成果进行改造加工的过程。虽然再制造也要消耗部分能源、材料和劳力,但它充分挖掘了成型零件中的材料、能源和加工附加值,使再制造产品的性能达到或超过新品,而成本仅为新品的 50%,节能 60%,节材 70%,环保显著改善。

以循环利用的对象来分类,再制造可以被归类为资源化。再制造和再循环都是以废旧机电产品为对象,通过加工将废旧产品变废为宝。由于再循环(如金属回炉冶炼、塑料重融、纸张溶解、贵金属化学萃取等方式)消耗较多能源,而得到的产物仅为原材料,再制造应被视为资源化中的首选途径。

物质资源和能量的循环利用是循环经济的表面表现形式。实际上,在经济活动中存在四个层次的循环经济:

(1) 废弃物资源的能源回收利用。这是循环经济的最低层次。在实践中表现为对废弃物进行回收分类,对含有能量的有机废弃物进行焚烧以回收其内部蕴含的能量。发达国家最早采用这种循环经济模式,并通过不断的技术研究与开发,逐步解决了废弃物焚烧过程中产生的污染问题。

(2) 废弃物作为物质资源的再生利用。在物质循环利用方面,这一层次比第一层次的循环经济具有更高的效率。例如,用废钢铁炼钢节省了大量的铁矿石和炼铁所需的能源;废旧塑料经过分类改性后,可以与新塑料材料混合制造塑料产品,从而替代部分新塑料原料。然而,这种形式的资源循环利用受限于资源随再生利用次数增加而产生的性能衰减,不能无限进行下去。

(3) 废弃物中 useful 成分的全面分类回收。这一层次的循环经济将废弃物中的所有有用成分全面回收,并根据每种成分的物理和化学性能,将其作为原材料制造新的产品。例如,高炉瓦斯灰作为炼铁过程中的废弃物,最初级的循环利用是用于制造建材。通过新技术,企业首先将高炉瓦斯灰中的金属成分(如铁、锌、铜、铬、镓等)全部回收,最终剩余物才用于制造建材。这一层次的循环经济最大化了废弃物的经济价值,代表了循环经济的高级形式。

(4) 废旧产品重要零部件的功能性循环,即再制造。再制造是循环经济的最高境界。其实践形式是对旧的重要零部件进行回收,经过内部探伤检测,对无内部缺陷的零部件的工作部位进行再生修复,形成与原来的新零部件具有同等功能或更高功能的新零部件,实现产品零部件功能的再生循环利用。这不仅节省了制造新零部件所需的原材料,还简化了制造新零部件的复杂过程和能源消耗,大大降低了制造成本,因而具有最高的资源效率、生产效率、能源效率、经济效率和环境效率。

循环经济是一种新的发展理念,是一种新的生产方式,是一系列的产业形态。发展循环经济不仅是坚持以经济建设为中心的体现,更是用发展来解决资源约束和环境污染问题的现实途径。为了推动循环经济的发展,我们需要从以下几个方面着手:

(1) 政策支持。政府应制定和实施支持循环经济和再制造产业发展的政策和法规,如提供税收优惠、资金支持和技术研发支持,鼓励企业开展再制造和循环利用活动。加强对再制造产品的质量监管和市场监督,确保再制造产品的质量和安全,提升消费者对再制造产品的认可度和接受度。

(2) 技术创新。企业应积极开展再制造和循环利用技术的研发和应用,提升再制造产品的质量和性能。通过采用先进的制造技术和设备,如激光清洗、激光修复和智能制造,提高再制造过程的效率和精准度,确保再制造产品的质量和性

能可以达到或超过原有产品。

(3) 教育宣传。通过广泛的教育和宣传活动,提升公众对循环经济和再制造的认识,改变传统的消费观念,树立资源循环利用和可持续发展的理念。可以通过学校教育、媒体宣传和社区活动等多种形式,普及循环经济和再制造的相关知识,推广成功案例和实践经验,增强公众的环保意识和社会责任感。

(4) 国际合作。循环经济和再制造是全球性的问题和挑战,需要各国政府、企业和组织的共同努力和合作。通过国际合作,可以共享循环经济和再制造的先进技术和成功经验,推动再制造标准和法规的国际化,促进全球再制造产业的发展。例如,国际组织可以通过制定全球性的再制造标准和认证体系,推动各国再制造产业的规范化和标准化发展,同时鼓励跨国企业和机构开展再制造技术的研发和应用,推动全球再制造产业的协同发展。

1.2.2 智能再制造体系

智能再制造体系是指基于现代信息技术、智能化制造技术以及再制造理念构建的一种高度智能化、全过程优化的再制造系统。它不仅仅局限于传统再制造的工艺和技术,更是通过数据驱动的智能决策和自动化技术,实现废旧产品零部件的高效修复和再利用,以达到资源高效利用、环境保护和经济效益最大化的目标^[3, 4]。

1) 智能再制造体系的构成

智能再制造体系不仅包括再制造的物理过程,还包括再制造的信息管理、数据分析和决策支持等环节,通过集成化的信息平台 and 智能化的制造设备,实现再制造过程的自动化、智能化和高效化。

2) 智能再制造体系的发展背景

(1) 资源紧缺和环境压力。随着全球资源的日益紧缺和环境问题的日益严重,传统的线性经济模式已经无法满足可持续发展的需求。再制造作为一种高效的资源利用和环境保护策略,受到了全球范围内的广泛关注。

(2) 技术进步和创新。随着信息技术和智能制造技术的快速发展,再制造过程的自动化、智能化和高效化成为了可能。通过集成先进的技术和设备,再制造可以实现更高质量、更低成本和更短周期的生产。

(3) 市场需求和政策支持。随着消费者对环保和可持续产品的需求增加,以及政府对循环经济和再制造产业的支持,再制造市场呈现出快速增长的态势。智能再制造体系作为再制造的高级形式,具有广阔的市场前景和政策支持。

3) 智能再制造体系的关键技术

(1) 智能检测技术。智能检测技术是指利用先进的传感器、图像识别和数据

分析技术,对退役产品的性能和状态进行智能化的检测和评估。通过智能检测技术,可以实现对退役产品的快速、准确和全面的检测,为再制造过程提供可靠的数据支持。

(2) 智能拆解技术。智能拆解技术是指利用自动化设备和机器人技术,对退役产品进行智能化的拆解和分类。通过智能拆解技术,可以实现对退役产品的高效、安全和环保的拆解,为再制造过程提供优质的原材料和零部件。

(3) 智能清洗技术。智能清洗技术是指利用先进的清洗设备和清洗剂,对退役产品进行智能化的清洗和去污。通过智能清洗技术,可以实现对退役产品的彻底、高效和环保的清洗,为再制造过程提供清洁的零部件和原材料。

(4) 智能修复技术。智能修复技术是指利用先进的修复设备和修复材料,对退役产品进行智能化的修复和更新。通过智能修复技术,可以实现对退役产品的高质量、低成本和短周期的修复,为再制造过程提供优质的零部件和产品。

(5) 智能再制造管理系统。智能再制造管理系统是指利用先进的信息技术和数据分析技术,对再制造过程进行智能化的管理和优化。通过智能再制造管理系统,可以实现对再制造过程的实时监控、数据分析和决策支持,提高再制造过程的效率和质量。

4) 智能再制造体系的应用领域

智能再制造体系在各种工业领域和产品类型中都有广泛的应用,包括航空航天、汽车制造、电子设备、机械设备等。

(1) 航空航天领域。航空再制造是智能再制造体系的一个重要应用领域。通过集成先进的检测、拆解、清洗、修复和再制造技术,航空再制造可以实现对退役航空发动机、起落架和机身结构等关键部件的高效、高质量和低成本的再制造。例如,美国通用电气公司通过建立智能再制造中心,实现了对退役航空发动机的智能化再制造,不仅提高了再制造产品的质量和性能,还降低了再制造产品的成本 and 环境影响。

(2) 汽车制造领域。汽车再制造是智能再制造体系的另一个重要应用领域。通过集成先进的检测、拆解、清洗、修复和再制造技术,汽车再制造可以实现对退役汽车零部件的高效、高质量和低成本的再制造。例如,美国福特汽车公司通过建立智能再制造工厂,实现了对退役发动机、变速箱和悬挂系统等关键零部件的智能化再制造,不仅提高了再制造产品的质量和性能,还降低了再制造产品的成本 and 环境影响。

(3) 电子设备领域。电子再制造也是智能再制造体系的一个重要应用领域。通过集成先进的检测、拆解、清洗、修复和再制造技术,电子再制造可以实现对退役电子产品的高效、高质量和低成本的再制造。例如,美国苹果公司通过建立智能再制造工厂,实现了对退役 iPhone、iPad 和 Mac 电脑等电子产品的智能化再

制造，不仅提高了再制造产品的质量和性能，还降低了再制造产品的成本和环境影响。

(4) 机械设备领域。智能再制造体系通过全面的检测和精准的再加工技术，赋予废旧生产设备新的生命，显著延长其使用寿命，减少停机时间和维修成本。例如，对数控机床进行智能再制造，可以修复磨损部件、升级控制系统，使其性能恢复到接近新机水平。此外，通过智能再制造技术翻新工业机器人，可以延长其使用寿命，提高生产效率和安全性。

5) 智能再制造体系的未来发展

智能再制造体系作为循环经济的新引擎，具有广阔的发展前景和重要的战略意义。智能再制造体系面临的挑战与未来发展方向如下所述。

(1) 法律与政策支持。智能再制造体系需要相应的法律和政策支持，以推动废旧产品的再利用和资源的合理配置。这包括制定再制造标准、加强知识产权保护、建立环保和安全监管制度等方面的政策措施。

(2) 技术挑战。智能再制造体系的实施面临着技术集成和系统优化的挑战。如何将各种技术有效整合，实现系统的高效运行和智能决策，是一个亟待解决的问题。

(3) 教育与人才培养。智能再制造技术的应用需要具备跨学科的综合能力，包括工程技术、数据分析、人工智能等多方面的知识和技能。因此，加强相关领域的教育培训和人才引进，对于智能再制造体系的发展至关重要。

(4) 国际合作与经验交流。智能再制造体系的发展需要国际的合作与经验交流，尤其是在技术标准、环保政策和市场开拓方面。通过与国际先进水平的对接，可以加快我国智能再制造体系的建设和推广应用。

1.2.3 再制造的政策支持及发展趋势

再制造作为一种可持续发展的重要策略，通过对废旧产品和零部件进行高效利用和再生，既能够减少资源消耗，又能有效降低环境负荷。在中国，再制造产业的发展经历了从无到有、不断完善的过程，政府在制定和实施相关政策方面起到了至关重要的作用。

1. 再制造的法制化进程

再制造的法制化进程是推动其发展的基础和保障。随着我国经济结构调整和环境意识的提高，政府逐步加大了对再制造行业的法律法规支持和制定力度。

从 2005 年开始，国家开始在高层文件中首次明确提出支持废旧机电产品的再制造。2005 年发布的《国务院关于加快发展循环经济的若干意见》（国发〔2005〕

22号)中,首次对再制造进行了政策性的引导和支持。这标志着再制造在国家战略层面的认可和推广。随后,2009年《中华人民共和国循环经济促进法》的实施进一步强化了对再制造的法律依据,为再制造产业的法制化打下了坚实基础。

目前,已在国家层面上制定了数十项与再制造相关的法律法规及标准规范,并在文件中明确涵盖了从再制造产品标识、产品质量控制到财税政策等多个方面的相关内容,为再制造行业的规范发展提供了法律支持和指导。

2. 再制造政策法规的具体化

随着再制造产业的不断发展,政府对再制造政策法规的具体化和细化逐步加强,体现在多个方面的实施细则和管理措施上。

1) 再制造产品标识方面

为推动再制造产品的市场认知和消费者信任,政府在再制造产品标识管理方面进行了积极探索和规范化。例如,2010年,国家发展改革委、国家工商管理总局联合发布了《关于启用并加强汽车零部件再制造产品标志管理与保护的通知》(发改环资〔2010〕294号)。此举明确要求再制造产品在明显位置或包装上使用标志,以便消费者能够识别和区分再制造产品。此外,工业和信息化部也在2010年发布了《再制造产品认定实施指南》(工信厅节〔2010〕192号),涵盖了通用机械设备、专用机械设备、办公设备、交通运输设备及其零部件等多个再制造产品领域,进一步明确了产品标识的管理和应用要求。2012年5月1日,中国国家标准《再生利用品和再制造品通用要求及标识》(GB/T 27611—2011)正式实施,有效规范了再生利用和再制造产品的基本要求与标识方式,有助于促进资源的循环利用和环境保护。在汽车零部件再制造领域中,国家发展改革委等部门联合发布了《关于印发〈汽车零部件再制造规范管理暂行办法〉的通知》(发改环资规〔2021〕528号),以及中国国家标准《汽车零部件再制造产品 标识规范》(GB/T 39895—2021)中,都明确规定了应当在再制造产品上明示所提供的再制造产品不低于原形新品的质量保障和售后服务,并在显著位置标注再制造企业商标和“再制造产品”标识。

2) 再制造产品质量控制方面

为保障再制造产品的质量和市场竞争力,政府积极制定了一系列的有关质量控制的政策文件和标准认证体系。2010年,工信部发布了《再制造产品认定管理暂行办法》(工信部节〔2010〕303号),建立了严格的产品认定制度,确保再制造产品符合国家标准和质量要求。进一步地,2013年,国家发展改革委、财政部、工业和信息化部、质检总局联合发布了《再制造单位质量技术控制规范(试行)》(发改办环资〔2013〕191号),明确了再制造单位在回收、生产、销售等环节中

的质量控制要求。《汽车零部件再制造规范管理暂行办法》明确规定了再制造企业应制定完善的再制造质量控制及质量检验规章制度，并要求配置相应人员和设备等。相继发布实施的《再制造 机械产品清洗技术规范》（GB/T 32809—2016）、《再制造 电刷镀技术规范》（GB/T 37674—2019）、《再制造 机械产品修复层质量检测方法》（GB/T 40728—2021）、《再制造 激光熔覆层性能试验方法》（GB/T 40737—2021）、《再制造 等离子喷涂技术规范》（GB/T 44025—2024）等国家标准，为再制造企业提供了具体的操作指南和技术支持。

3) 再制造财税政策方面

财税政策对再制造行业的发展起到了重要支持作用。2010年，国家发展改革委、人民银行、银监会、证监会联合发布了《关于支持循环经济发展的投融资政策措施意见的通知》（发改环资〔2010〕801号），明确了信贷支持的重点循环经济项目，包括废旧汽车零部件、工程机械、机床等产品的再制造项目。此外，2013年，国家发展改革委、财政部、工业和信息化部、商务部、质检总局联合发布了《关于印发再制造产品“以旧换再”试点实施方案的通知》（发改环资〔2013〕1303号），推动再制造产品“以旧换新”的试点工作，进一步降低了再制造项目的投资成本和市场运营风险。

3. 地方政府的再制造政策实施情况

除了国家层面的政策支持外，各地方政府也积极响应国家政策，制定和实施了一系列具体的再制造相关政策和法规。例如，2009年，江苏省发布了《江苏进口再制造用途旧机电产品检验监管实施细则（试行）》，明确了从事进口旧机电产品再制造的企业应具备的资质和管理要求。2010年，广东省发布了《广东省循环经济发展规划（2010—2020年）》，明确提出要推进废旧汽车和废旧轮胎等产品的再制造，重点支持再制造关键技术的攻关和示范推广项目。2021年12月，广东省成立了广东省再制造产业联盟，旨在贯彻落实《中华人民共和国循环经济促进法》，促进广东省再制造产业的快速发展。2022年，海南省印发了《海南省“十四五”再制造产业培育发展工作方案》，重点探索海南再制造产业突破点，积极培育再制造重点领域。此外，山东省和上海市等地也相继出台了具体的再制造发展规划和实施方案，通过政策激励和项目支持，加快了再制造产业链的发展和扩展，促进了当地经济的转型升级和资源利用效率的提升。

4. 再制造在产业化政策支持下的未来发展趋势

工业和信息化部印发了《高端智能再制造行动计划（2018—2020年）》，旨在