

再制造工程和表面工程对循环经济贡献分析*

徐滨士, 刘世参, 史佩京

(装备再制造技术国防科技重点实验室, 北京 100072)

摘 要: 阐述了再制造工程在循环经济中的地位和发展背景, 剖析了废旧发动机在材料水平、零件水平和整机水平循环利用的节能效益和环保效益, 讨论了再制造工程与表面工程的关系。研究表明, 以再制造方式实施整机水平的循环利用, 其节能效益和环境保护效益最佳, 再制造 1 万台废旧发动机可节电 1.45×10^8 kWh, 减少 CO₂ 排放 0.6 kt; 表面工程在发动机再制造中的应用, 可使发动机的旧件利用率由 72.3 % 提高到 90 %。

关键词: 再制造工程; 表面工程; 循环经济; 节能; 环保

中图分类号: TH17; F4

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2006)01-0001-06

Contribution of Remanufacturing Engineering and Surface Engineering to Cycle Economy

XU Bin-shi, LIU Shi-can, SHI Pei-jing

(National Key Laboratory for Remanufacturing, Beijing 100072)

Abstract: The status and development background of remanufacturing engineering in cyclic economy were described, the energy conservation profit and environmental protection effect of failed engines were analyzed, and the relationship between remanufacturing engineering and surface engineering was discussed. The results showed that the energy conservation profit and environmental protection effect are the best when the failed engines are overall remanufactured. Remanufacturing 10000 engines, the energy could be saved by 14.5 millions kilowatt-hours and the emission of CO₂ could be reduced by 0.6 thousands tons. The application of surface techniques in remanufacturing engineering could improve the utilization ratio of old engine parts from 72.3 % to 90 %.

Key words: remanufacturing engineering; surface engineering; cycle economy; energy conservation; environmental protection

0 引 言

党的十六届五中全会通过的《中共中央关于制定十一五规划的建议》中指出, 要加快建设资源节约型、环境友好型社会, 大力发展循环经济, 在全社会形成资源节约的增长方式 and 健康文明的消费模式, 并力争在“十一五”期间实现人均国内生产总值比 2000 年翻一番; 资源利用效益显著提高, 单位国内生产总值能源消耗比“十五”期末降低 20 % 的目标。

建设节约型社会是我国新时期社会发展的必然选择, 节约的核心是节约资源、能源。实践证明, 再制造可使废旧机电产品中蕴含的价值得到最大限度的开发和利用, 是废旧机电产品资源化的最佳

形式和首选途径, 是节约资源的重要手段。对废旧机电产品进行再制造是发展循环经济、建设节约型社会的重要举措。

再制造工程是以产品全寿命周期理论为指导, 以废旧产品性能跨越式提升为目标, 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, 来修复、改造废旧产品的一系列技术措施或工程活动的总称。简言之, 再制造工程是废旧产品高技术修复与改造的产业化^[1~3]。

再制造工程的研究业已引起了我国政府的高度重视。国务院颁发的国发[2005] 21 号文件《国务院关于做好建设节约型社会近期重点工作的通知》和国发[2005] 22 号《国务院关于加快发展循环经济若干意见》中均指出: 国家将大力“支持废旧机电产品再制造”, 并把“绿色再制造技术”列为“国务院有关部门和地方各级人民政府要加大经费支持力度”的关键、共性项目之一。

收稿日期: 2006-01-06; 修回日期: 2006-01-23

基金项目: *国家发改委论证项目(2004 环资 4-01-01, 2005 环资 05-29); 中国工程院咨询项目(2005-05)

作者简介: 徐滨士(1931-), 男(汉), 哈尔滨市人, 教授, 院士, 博导。

再制造工程是表面工程应用的载体,表面工程是再制造工程的关键技术之一,对提高再制造产品的资源利用率发挥着重要作用。分析和研究再制造工程、表面工程对循环经济的贡献,对推动我国再制造产业发展具有重要意义。

1 再制造工程在循环经济中的地位

在工业发达国家中,废旧机电产品数量大,造成的危害暴露较早,因而在循环利用和保护环境方面较早地提出了相应对策。美国从工业发展的角度建立了带有循环经济色彩的“3R”体系(再利用、再制造、再循环);日本从环境保护的角度制定了废旧物资利用的“3R”体系(减量化、再利用、再循环)。

近期,国家颁布的“十一五”发展规划将循环经济的基本原则高度概括为:“减量化、再利用和资源化”^[4]。2004 年 10 月,在上海“世界工程师大会”上,全国政协副主席、中国工程院院长徐匡迪院士结合中国国情,创造性的提出了关于建设我国循环经济的“4R”工程(减量化-Reduce,再利用-Reuse,再循环-Recycle,再制造-Remanufacture),这就从操作层面上阐述了具有中国特色的循环经济模式^[5]。

从广义的物资循环利用出发,再制造既可以划归为再利用,也可以划归为资源化。作者认为,在物资的流程中,再利用界定为可直接利用或经简单处理即可利用,其主要特点是以极少的能源、材料和劳力投入即可再次使用。再循环应界定在通过金属回炉冶炼、塑料重融、纸张溶解、贵金属化学萃取等方式获得的原质材料或变质原材料,其特点是要消耗较多的能源和劳力投入,得到的产品只是原材料。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、运用新的科技成果进行改造的过程,再制造虽然也要消耗部分能源、材料和一定的劳力投入,但是,它充分挖掘了蕴涵在成形零(部)件中的材料、能源和加工附加值,使经过再制造的产品性能达到或超过新品,而成本是新品的 50%、节能 60%、节材 70%,环保显著改善。若以节能、节材和保护环境的贡献大小为指标来比较,再制造不如再利用,但远远优于再循环。再制造和再循环都是以废旧机电产品为对象,通过加工变废为宝。

因此,二者均属于资源化的范畴,其中再制造是废旧机电产品资源化的首选途径^[6-8]。

2 再制造工程发展的背景

2.1 紧迫的社会发展需求

19 世纪 30 年代,美国遭遇了大萧条,由于资金和资源缺乏,更多的汽车被实施再制造。珍珠港事件后,美国加入第二次世界大战,商用车的生产受到控制,再制造成为轿车和货车维持运转的唯一方法。

从再制造的发展历史可以看出,在上世纪再制造是作为一种应急措施而得到发展。但是进入 21 世纪后,由于全球矿产短缺和对环境改善的高要求,再制造已成为具有战略意义的必然选择。

工业革命以来,人类在创造巨大物质财富的同时,也付出了巨大的资源和环境代价。在推进工业化的初期,人类还没有深切体会到自然资源供给和环境容量的有限性。随着人口的持续增加,经济规模的不断扩大,传统的生产模式带来的资源短缺和环境污染,迫使人类进行深刻反思。

进入 20 世纪,人类创造的物质财富超过了以往 5000 年的历史总和,但也极端消耗了地球资源。传统的经济增长模式又带来许多负面效应。制造业是所有产业中最大的资源使用者,也是最大的环境污染源之一。据统计,全世界制造业每年产生 55 亿吨无害废物和 7 亿吨有害废物,占全球污染物总量的 70%以上。

图 1 给出了全球重要金属矿 2000 年分析的可开采年限(储产比),几十年时间只是弹指一挥间,矿产资源的紧缺性可想而知^[9]。

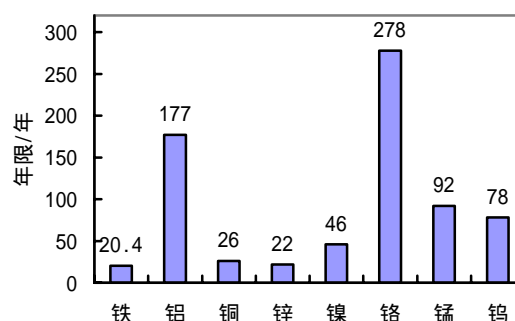


图 1 全球重要金属矿可开采年限(2000 年)

Fig.1 Mining workable years of global metallic minerals (2000)

党的十六大提出了全面建设小康社会的目标和任务。实现这一战略部署，必须紧紧抓住和切实用好本世纪头 20 年的重要战略机遇期。去年我国人均 GDP 已超过 1000 美元，开始向中低收入国家迈进。国际经验表明，从低收入国家步入中低收入国家行列的阶段，对任何国家的成长来说都是一个极为重要的历史阶段，它既是一个“黄金发展时间”，又是“矛盾凸现时期”。特别是随着经济快速增长和人口不断增加，水、土地、能源、矿产等资源不足的矛盾会越来越突出，生态建设和环境保护的形势日益严峻。加快全面建设小康社会进程，保持经济持续快速增长，资源消费的增加是难以避免的。但如果继续沿袭传统的发展模式，以资源的大量消耗实现工业化和现代化，是难以为继的。面对这种情况，按照科学发展观的要求，大力发展循环经济，加快建立资源节约型社会，就显得尤为重要、尤为迫切^[10]。大力发展循环经济中的 4R 工程，充分发挥再制造在废旧机电产品资源化对节能、节材、保护环境、支持国家建设具有重要意义。

2.2 充足的再制造资源

再制造以废旧机电产品为对象和毛坯，废旧机电产品就是再制造的资源。全球可工业化开采的矿产资源绝大部分已不在地下，而以“废旧物资”的形态堆积在我们周围，构成了“都市矿山”，而且俯拾皆为富矿^[11]。图 2 列出了 2003 年我国报废的汽车、家电和电脑和数量。随着人民生活水平的提高，机电产品更新换代的速度加快，废旧机电产品的数量会进一步增大，这些废旧机电产品弃之为害，用之为宝，它们构成了实施再制造的充足资源。

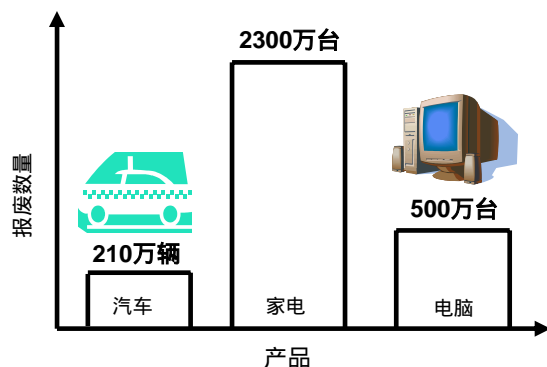


图 2 中国机电产品报废量 (2003 年)

Fig.2 Discard volume of Chinese mechanical and electronic products (2003)

2.3 良好的物质基础

再制造具有潜在价值的根本原因是机器中各部件的使用寿命不相等，而且每个零件的各工作面的使用寿命也不相等，这就为再制造的实施提供了物质基础。

在一部机器中通常固定件的使用寿命长，如箱体、支架、轴承座等，而运转件的使用寿命短。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。与腐蚀介质直接接触的表面使用寿命短，不与腐蚀介质接触的表面使用寿命长。这种各零部件的不等寿命性和零件各工作面的不等寿命性，往往造成由于机器中部分零件以及零件上局部表面的失效而使整个机器不能使用。再制造的着眼点是把没有损坏的零部件继续使用，把有局部损伤的零件采用先进的表面工程技术等手段通过再制造加工继续使用，而且可以针对失效的原因采取措施使它的使用寿命延长。这样就挖掘出了废旧机电产品中蕴含的附加值，起到节省资金、节能、节材、保护环境的效果。

2.4 显著的综合效益

一部机器、一个零件制造时的成本，由原材料成本、制造活动劳动成本、能源消耗成本和设备工具损耗成本构成，后三项成本称为相对于原材料成本的成品附加值（见图 3 所示）。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%（见图 4）^[12]。

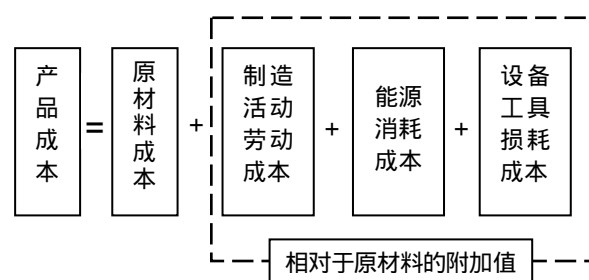


图 3 产品附加值分析

Fig.3 Additional value analysis of products

宏观统计资料表明，发动机原始制造和再制造过程中的能源消耗、劳动力消耗和材料消耗的对比见图 5^[13]。图中说明再制造过程中由于充分利用了废旧产品中的附加值，因而能源消耗只是新品制造中的 50%，劳动力消耗只是新品制造中的 67%，

原材料消耗只是新品制造中的 11%~20%。随着高新技术的发展和在再制造产品上的应用,材料和能源消耗将会进一步降低,对节约能源、节省材料和保护环境的贡献会更大。

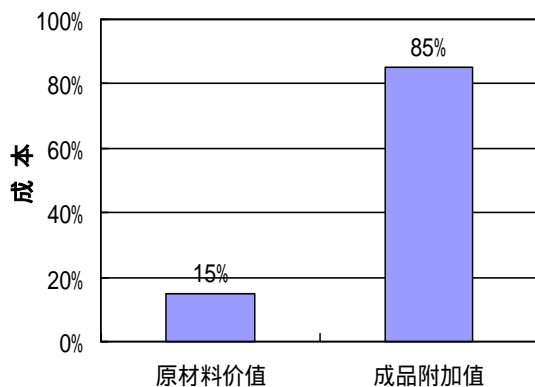


图4 发动机成本分析

Fig.4 Cost analysis of engines

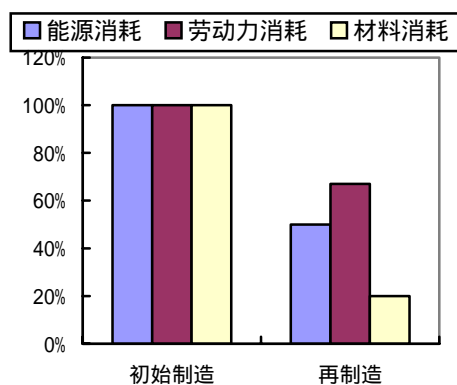


图5 发动机制造与再制造消耗对比

Fig.5 Comparison of consumption between manufacturing and remanufacturing

2.5 先进的技术支撑

一部机电产品制造出来以后,经过若干年后才达到报废阶段,而在这个期间科学技术发展迅速,新材料、新技术、新工艺、新控制装置不断涌现,对废旧机电产品进行再制造时可以吸纳最新的成果,既可以提高易损零件、易损表面的使用寿命,又可以对老产品进行技术改造,使它的整体性能跟上时代的要求。

再制造技术优于原始制造技术的典型例子是先进表面工程技术在再制造产品上的应用。机械产品的故障往往是个别零件失效造成的,而零件失效基本是由于局部表面造成的,例如,腐蚀从零件表

面开始,摩擦磨损发生在零件表面,疲劳裂纹也是由零件表面向内延伸的。如果应用表面工程技术将机械产品中那些易损零件的易损表面的失效期延长,则产品的整体性能就可以得到提高。现在表面工程技术发展非常迅速,已由传统的单一表面工程技术发展到复合表面工程技术,进而又发展到以微纳米材料、纳米技术与传统表面工程技术相结合的纳米表面工程技术阶段。

再制造的特性决定了再制造生产中能敏锐地不断吸纳最先进的表面工程技术,使得再制造产品的性能不断提升以赢得用户的信赖,使得再制造产品的成本不断下降以增强市场竞争力,使得再制造过程中节约能源、节约材料、保护环境的作用更加突出,以对国家可持续发展做出更大贡献。而对于机电产品的原始制造而言,即使仍然在进行生产,也很少吸纳新材料、新技术、新工艺等方面的成果,因为调整工艺流程,更换工装设备是一件很不容易的事情。制造商只是把新的科技成果引入到下一代的产品中,不轻易改动老产品的制造技术和工艺。

再制造技术与原始制造技术的差别,是再制造产品的性能可以达到甚至超过新品的主要原因。

3 废旧机电产品循环利用的三水平及效益分析

3.1 在材料水平上的循环利用

在材料水平上循环利用,是指将废旧机电产品先转化为原材料而后利用。以汽车发动机为例,其主要材料为钢铁、铝材和铜材。当发动机达到报废标准,传统的资源化方式是将发动机拆解、分类回炉,冶炼成型材后进一步加工利用。经过这些工序,原始制造的能源消耗、劳动力消耗和材料消耗等各种附加值绝大部分被浪费,同时消耗了大量能源,又造成了严重的二次污染。

据统计,一万台WD615-67型斯太尔发动机中含钢铁5837吨、铝材160吨、铜材19吨。每回炉1吨钢铁耗能1784 kWh、排放CO₂0.086 t;每回炉1吨铝材耗能2000 kWh、排放CO₂0.17 t;每回炉1吨铜材耗能1726 kWh,排放CO₂0.25 t。按照上述数据测算,回炉1万台发动机的钢铁、铝材和铜材共耗能 1.076×10^8 kWh,排放CO₂533.93 t。

3.2 在零件水平上的循环利用

在零件水平上循环利用,是指把废旧发动机中有继续使用价值的零部件经过清洗处理或简单地

修复，可以作为发动机的配件在市场上流通。通过对 1 万台废旧斯太尔WD615-67 型发动机各零部件损坏情况的检测分析表明，清洗后可直接使用的主要零件数量上占 23.7%，在价值上仅占 12.3%，在重量上占 14.4%，节能效果为 2.23×10^7 kWh，减少CO₂排放 76.89 t。

当前，在零件水平上循环利用存在诸多弊端，一是由于此类零件的数量及种类有限；二是许多零部件由有执照拆解厂或无执照个体拆解清洗后直接进入配件市场，不能保证零部件的质量及使用性能。

3.3 在整机水平上的循环利用

在整机水平上循环利用，是指以废旧发动机整机为对象，通过再制造加工和技术改造，以再制造后的整机形态供应市场，发达国家已竞相采用该模

式。整机水平的循环利用是基于新品标准，采用专业化、大批量的流水线加工及生产方式，再制造后的整机性能和质量可达到或超过新品。据测算，再制造 1 万台废旧发动机耗能 1.03×10^7 kWh，与以材料水平的循环利用相比，其耗能仅为 1/15。与新发动机的制造过程相比，再制造发动机生产周期短，仅占新机制造周期的 46%（见表 1）；并且成本降低了 61%（见表 2）。

以年再制造 1 万台斯太尔发动机为例^[14]，则可以节省金属 7.65 kt，回收附加值 3.23 亿元，提供就业 500 人，并可节电 1.45×10^8 kWh，获利税 0.29 亿元，减少CO₂排放 0.6 kt，具体见表 3。由此可见，实施整机再制造对促进循环经济发展、节能、节材和保护环境等方面具有重要意义。

表 1 新机制造与旧机再制造的生产周期对比（天/台）

Table 1 Comparison of production period of engines between manufacture and remanufacture (days)

	生产周期	拆解时间	清洗时间	加工时间	装配时间
再制造发动机	7	0.5	1	4	1.5
新发动机	15	0	0.5	14	0.5

表 2 新机制造与旧机再制造的基本成本对比（元/台）

Table2 Comparison of basic cost of engines between manufacture and remanufacture(Yuan/RMB)

	设备费	材料费	能源费	新购零件费	税费	人力费	管理费	合 计
再制造发动机	400	300	300	10 000	3 400	1 600	400	16 400
新发动机	1 000	18 000	1 500	12 000	4 700	3 000	2 000	42 200

表 3 年再制造 1 万台 WD615-67 型斯太尔发动机的综合效益分析

Table3 Comprehensive benefit analysis of remanufacturing 10 thousands engines per year

	消费者节约投入/亿元	回收附加值/亿元	直接再用金属/万吨	提供就业/人	利税/亿元	节电度/kWh	减少CO ₂ 排放/kt
再制造	2.9	3.23	0.765 (钢铁 0.575、铝 0.15, 其它 0.04)	500	0.29	1.45×10^8	0.6

4 再制造工程与表面工程的关系

将再制造与表面工程结合，是再制造的创新发展。再制造是表面工程应用的载体，通过对废旧机电产品的再制造，可拓展表面工程的应用。一部机器损坏或者报废，主要的原因是零件表面失效，这就需要表面工程来进行治理，表面工程已成为再制造的关键技术之一。表面工程在零件再制造中的应用，不是消极地恢复尺寸，而是在恢复尺寸的同时根据需要积极地提高其表面性能，使再制造的零

件更加耐用，这是再制造产品在质量上能等同甚至超过原始制造的重要原因之一。例如，已研发的纳米热喷涂技术、纳米电刷镀技术、纳米减摩自修复添加剂技术、纳米防腐涂料技术、纳米粘接粘涂技术等纳米表面工程技术在再制造中的应用可使零件表面的耐磨性、耐蚀性、抗高温氧化性、减摩性、抗疲劳损伤性等力学性能大幅度提高。

国外再制造的历史已很长，目前国外发动机再制造产业中所使用的技术仍是以换件为主或使用

由两院士、师昌绪先生作序，李金桂研究员精心编著的《腐蚀控制设计手册》即将于2006年3月由化学工业出版社出版发行，该书共15章，168万多字，建立在大量调查研究的基础上，并对腐蚀与防护原理和方法进行了系统的描述，适用于机械、冶金、石化、兵器、航空航天等行业的设计、制造、使用、维护，是理论与实践相结合的一本重要参考书。