

2005 年中国机械工程学会年会

论文集



新型工业化道路 与西部制造业



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

2005 年中国机械工程学会年会
论文集

新型工业化道路与西部制造业

江苏工业学院图书馆
藏书章

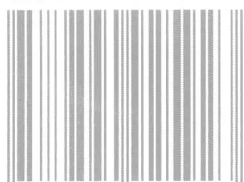
2005 年 11 月 5~8 日

中国·重庆



机械工业出版社

ISBN 7-89492-592-6



9 787894 925923 >

编辑出版

总 编 辑： 宋天虎

执行主编： 左晓卫 王淑芹

论文编辑： 张 彤 郑小光 罗晓琪 梁福军

杨绍臣 李兆林 刘 丹

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

ISBN 7-89492-592-6/TH • 64

印 刷： 北京机工印刷厂

定 价： 180.00 元

大会组织

主办单位: 中国机械工程学会

重庆市机械工程学会

支持单位: 中国机械工业联合会

国家自然科学基金委员会工程与材料科学部

重庆市人民政府办公厅

重庆市经济委员会

重庆市科学技术协会

重庆大学

协办单位: 重庆机电控股(集团)公司

重庆长安汽车股份有限公司

宗申产业集团有限公司

机械工业第三设计研究院

重庆汽车研究所

重庆市机电设计研究院

重庆机床厂

重庆齿轮箱有限责任公司

重庆江北机械有限责任公司

第三军医大学

重庆工学院

重庆汽车学院

2005 年中国机械工程学会年会秘书处

地 址: 北京市西城区三里河路 46 号

中国机械工程学会工作总部

邮政编码: 100823

电 话: 010-68595318 (学术); 010-68595316 (会务)

传 真: 010-68595314 (学术); 010-68594829 (会务)

电子邮箱: 2005nh@cmes.org

网 址: <http://www.cmes.org.cn>

前 言

2005 年中国机械工程学会年会将于 2005 年 11 月 5~8 日在秀美的山城——重庆隆重举行。届时，国内外同仁齐聚一堂，就“新型工业化道路与西部制造业”这一主题展开深入的讨论与研究。

我国西部地区地域辽阔，约占国土面积的 60%，资源丰富，潜力巨大。实施西部大开发战略，对于加速全国的发展，增强我国的综合国力，实现国民经济的持续稳定发展，具有极其深远的历史意义和十分重要的战略意义。

中国机械工程学会 2005 年年会在重庆召开，充分彰显了全学会系统面向国家战略需求，面向世界科学技术前沿，集中全学会的学术与技术资源支持西部大开发，配合当地政府、企业、科技组织和广大科技人员，探索振兴制造业大计的坚定决心。

本论文集收录了本届年会的各个专题的精华内容。出版形式为一书一盘，书中共收纳了 636 篇论文

的摘要，论文的全文部分则可以从所附光盘中查找。愿本书能够促进高科技与制造业的互动和影响，有利于与会代表和广大会员把握学术前沿、拓宽科研思路、交流科研工作经验，为各方专家代表提供一个高起点、大范围、多领域的学术交流平台。

本届年会筹备工作得到重庆市政府、科技界、高校及企业的大力支持，为年会的成功举办奠定了坚实的基础。全体作者和《机械工程学报》编辑部的同志们为本论文集的成集和出版付出了辛勤的劳动。在此一并向他们表示真诚的感谢！

金秋时节，让我们齐聚歌乐山麓、嘉陵江畔，共同迎接本届年会的圆满召开。

中国机械工程学会副理事长兼秘书长



2005 年 11 月

目 录

主旨报告

000001~000003..... (1)

第 4 届全国生物制造工程学术会议

010001~010009..... (31)

010010~010019..... (34)

010020~010024..... (38)

齿轮传动技术与齿轮制造技术研讨会

020001~020009..... (40)

020010~020016..... (42)

集成、高效、精密、绿色的生产工程 ——生产工程科技交流论坛

030101~030119..... (45)

030201~030220..... (50)

030301~030313..... (57)

030401~030414..... (60)

030501~030519..... (64)

第 9 届工业工程学术年会

040001~040003..... (71)

041001~041927..... (73)

042001~042910..... (172)

第 11 届全国特种加工学术会议

050001~050008..... (237)

050101~050136..... (239)

050201~050211..... (249)

050301~050322..... (252)

050401~050413..... (259)

050501~050521..... (263)

050601~050634..... (268)

汽车制造工程学术研讨会

070001~070007..... (278)

中欧工程教育研讨会

110101~110109..... (280)

110201~110209..... (288)

110301~110310..... (293)

其他

000101~001001..... (302)

论文编号、第一作者姓名与页码

对照检索..... (305)

□□□000001

发展再制造工程，构建循环经济，建设节约型社会*

徐滨士

(装甲兵工程学院装备再制造技术国防科技重点实验室，北京，100072)

摘要：制造业在创造巨大财富的同时，也极大消耗了资源和能源，并造成环境污染。为使我国走上可持续发展道路，节省资源、改善环境，党和国家正在大力倡导构建循环经济、建设节约型社会。以再制造为代表的“4R”(减量化、再利用、再循环、再制造)原则成为实现这一目标的重要手段。再制造工程是废旧产品高技术维修的产业化，也是“4R”中最具有活力的要素之一。再制造的健康发展需要全社会的共同努力。

关键词：再制造工程，循环经济，节约型社会，产业发展

0 前言

2005年6月27日颁发的国务院文件国发[2005]21号《国务院关于做好建设节约型社会近期重点工作的通知》中把“绿色再制造技术”列为“国家科技计划继续加大对节约资源和循环循环经济关键技术的攻关力度，组织开发和示范有重大推广意义”的技术之一。

2005年7月5日颁发的国务院文件国发[2005]22号《国务院关于加快发展循环经济若干意见》中指出国家将大力“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有关部门要加大科技投入，支持循环经济共性和关键技术研究开发”的项目之一。

1 循环经济的发展

发展是硬道理，但建立在拼资源和能源的基础上的发展模式是不符合我国国情的，循环经济成为社会可持续发展的必然选择。近几年，我国采取了一系列措施推动循环经济发展。

2003年9月，党的十六届三中全会指出：“今后我国社会经济发展模式必须进一步规范，应以科学发展观为指导，以优化资源利用为核心，以提高资源生产率和降低废弃物排放为目标，以技术创新和制度创新为动力，逐步建立与我国基本国情相适应的发展循环经济的宏观调控体系和运行机制，加快建设资源节约型

* 国家自然科学基金重点项目(50235030)；中国工程院2002年咨询项目(12/2002A)；国家发改委论证项目(2004环资4-01-01；2004环资4-01-03)。

和生态保护型社会。”

2004 年 9 月中旬,党的十六届四中全会通过的《中共中央关于加强党的执政能力建设的决定》中进一步明确提出:“重视节约资源、保护环境和安全生产,大力发展循环经济,建设节约型社会。”

2004 年 9 月下旬,在“全国循环经济工作会议”上,国家发改委主任马凯作了“贯彻和落实科学发展观,大力推进循环经济发展”的主题报告,代表国家对我国发展循环经济的重要性、紧迫性,以及总体思路和主要措施进行了详细阐述,并明确指出今后的国家投资将重点向具有循环经济特色的产业或企业倾斜^[1]。

2004 年 11 月,全国政协副主席、中国工程院徐匡迪院长在上海“世界工程师大会议”上,创造性地提出了关于建设我国循环经济的“4R”发展战略(Reduce 减量化,Reuse 再利用,Recycle 再循环,Remanufacture 再制造)。徐匡迪院长指出:“在新世纪里,工程科学要从单纯追求规模、效益转向建设‘4R’的循环经济的方向。大力推进‘4R’是实现可持续发展的重要内容和必然选择。追求‘4R’的最终目标是实现循环经济,用尽可能少的资源满足经济社会发展的需求,通过节约、回收和利用废旧资源,使尚未被充分利用的价值得到开发和使用,产生新的经济和社会效益。”^[2]

2004 年 12 月,在“中央经济工作会议”上,胡锦涛总书记强调:“在当前和今后相当长的一个时期里,全国经济建设必须坚决扭转高消耗、高污染、低产出的状况,全面转变经济增长方式。要坚持开发与节约并举,把节约放在首位,大力发展循环经济,逐步构建节约型的产业结构和消费结构,走出一条具有中国特色的节约型发展道路。”^[3]

2005 年 5 月 16 日,胡锦涛总书记在“2005 北京‘财富’全球论坛”开幕式上指出:“中国将坚持走新型工业化道路,着力调整经济结构和加快转变经济增长方式,提高经济增长的质量和效益,大力发展循环经济,建设资源节约型、环境友好型社会,走生产发展、生活富裕、生态良好的文明发展道路。”^[4]

2005 年 3 月 22 日,在最新出版的《2004 科技中国》一书中,工程院徐匡迪院长再次指出:“减量化、再利用、再循环、再制造,工程科技的 4R 发展要为循环经济做贡献。”^[5]

2005 年 6 月,我们的论文《大力发展再制造产业》在《求是》杂志上发表,意味着在建设循环经济过程中,再制造的作用得到了党中央的高度重视^[6]。

2 循环经济的内涵

从资源流程和经济增长对资源、环境影响的角度考察,经济增长方式存在着两种模式:一种是传统增长模式,即“资源—产品—废弃物”的单向直线过程,

这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,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,促进资源能源的永续利用。

概括地说,循环经济是一种以资源的高效利用和循环利用为核心、以“4R”(减量化、再利用、再循环、再制造)为原则,以低消耗、低排放、高效率为基本特征的社会生产和再生产活动。循环经济的实质是以尽可能少的资源消耗、尽可能小的环境代价实现最大的发展效益。循环经济是对传统经济“大量开采、大量消费、大量废弃”发展模式的重大变革^[1]。

循环经济可以看成是“废物经济”、“效率经济”和“生态经济”的集合体。废物经济主要指对废旧资源的循环利用,涉及到“4R”中的再利用和再循环;效率经济是指对资源能源的节约使用和高效利用,以及对废旧产品附加新一轮劳动创造后使其具有更高的价值,涉及到“4R”中的减量化和再制造;而生态经济是指把经济社会发展看成是“经济—社会—生态”三者统一的整体,用以提高资源和能源的使用合理性,降低废物的排放量和污染程度,减少原生制造,它涵盖了“4R”的全部,但以再制造为主要代表。

3 再制造工程

3.1 再制造工程的内涵

作为循环经济“4R”原则中最活跃、最先进的要素之一,再制造得到了快速发展。再制造是指以产品全寿命周期理论为指导,以废旧产品实现跨越式发展为目标,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^[7]。简言之,再制造工程是废旧产品高技术维修的产业化。再制造的对象—“产品”是广义的。它既可以是装备、设备、系统、设施,也可以是其零部件;既包括硬件,也包括软件。

再制造的重要特征是再制造产品的质量和性能达到甚至超过新品,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。

产品从论证、设计、制造、使用、维修,直至报废的全过程所花费的费用称为全寿命周期费用。传统观念往往注重对占全寿命周期费用20%~30%的产品前半生(论证、设计、制造阶段)的研究,而却忽视了对占全寿命周期费用70%~80%的产品后半生(使用、维修、报废阶段)的研究。再制造就是以产品后半生为研究对象,提升、改造废旧产品的性能,使废旧产品重获生命力。图1为再制造在产品全寿命周期中的位置。

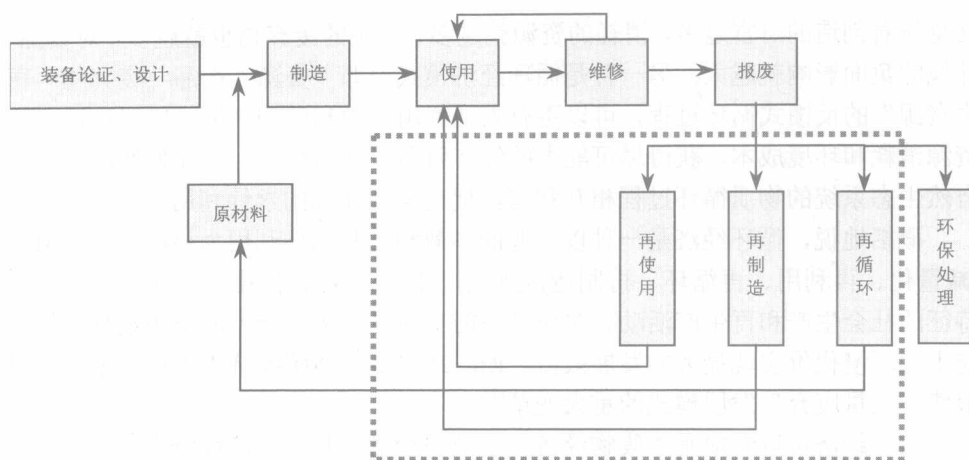


图1 装备再制造工程在装备全寿命周期的位置

3.2 再制造工程的发展

发达国家的工业化发展较快，废旧产品的处理问题也暴露得较早，因而对废旧产品进行再制造的实践历程也较长。

至20世纪90年代，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(Reuse 再利用, Recycle 再循环, Remanufacture 再制造); 日本从环境保护的角度建立了废旧资源利用的“3R”战略(Reduce 再减量, Reuse 再利用, Recycle 再循环)。

1996年，美国出版了对再制造产业的研究报告《再制造业：潜在的巨人》^[8]。报告显示，1996年，美国专业再制造公司达73000个，年销售额超过530亿美元，直接雇员48万人。预计到2005年，再制造雇佣员工100万，年销售额1000亿美元；到2010年，保证100%再制造产品性能达到或超过原产品；到2020年，美国再制造业基本实现零浪费，并确保再制造产品的高质量和优质服务。

图2(a)、(b)分别为美国1996年再制造业^[8]与钢铁业^[9]销售额与雇员数的比较，可见再制造业的销售额与钢铁业相当，但雇员数却高于钢铁业一倍，充分展示了再制造业拉动国民经济，提高就业率的巨大作用。

美军是最大的再制造受益者，美军车辆和武器通常使用再制造部件，节约了制造费用，延长了装备寿命，提高了装备的作战能力。美军B-52轰炸机于1961~1962年生产，1980年、1996年两次再制造改造后，性能得到极大提高，预计服役年限可到2030年。

我国对再制造工程的探索从20世纪90年代开始^[10]，但将再制造工程作为一门学科与产业体系加以全面研究并推广，则是从1999年开始的。

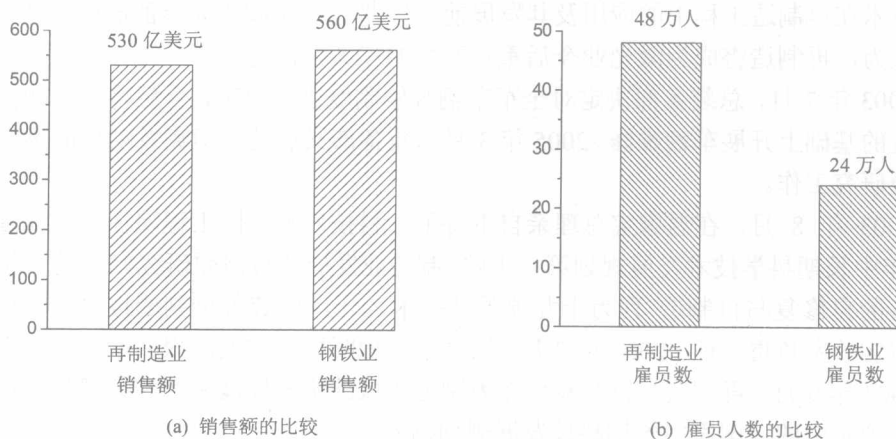


图2 美国再制造业与钢铁制造业的比较

1999年6月,在西安召开的“先进制造技术”国际会议上,我们发表了《表面工程与再制造技术》的学术论文^[11],在国内学术会议上首次提出了“再制造”的概念。

1999年12月,在国家自然科学基金委机械学科“十五”前沿及优先资助领域研讨会上,我们提出的“再制造工程技术及理论研究”被列为国家自然科学基金机械学科发展前沿与优先发展领域^[12],并于2002年获得了国家自然科学基金的重点资助。2004年11月和2005年1月,国家自然科学基金委机械学科召开了两次国家机械学科“十一五”前沿及优先资助领域研讨会,“资源循环型制造与再制造”在会上受到了基金委和专家的充分肯定,再制造研究有望在“十一五”期间继续得到重点资助。

2000年3月,在瑞典哥德堡召开的第15届欧洲维修国际会议上,我们发表了题为《面向21世纪的再制造工程》的会议论文,这是我国学者在国际上首次发表“再制造”论文^[13]。

2000年12月,12位院士及12名专家完成了《绿色再制造工程及其在我国应用的前景》咨询报告^[14],中国工程院将此报告呈报国务院。国务院办公厅批转国务院10部委研究参阅。

2001年5月,总装备部批准建设我国首家再制造领域的国家级重点实验室——装备再制造技术国防科技重点实验室,挂靠装甲兵工程学院。2003年6月,实验室通过了总装备部和国防科工委的联合验收,现已投入正常运转。2002年6月,在第184次香山科学会议上,题为“绿色再制造材料成形加工关键技术及其基础”^[15]的特邀大会报告引起了与会科学家的广泛重视,认为再制造工程的研究与发展“利在当代,功在千秋”。2003年9月,在第210次香山激光科学会议上,“激光

制造技术在再制造工程中的应用及其发展前景”^[16]一文引起激光界的高度关注,会议认为,再制造将成为激光业今后重点开拓的三大方向之一。

2003 年 7 月,总装备部决定对全军车辆维修制度进行改革,今后将在发动机再制造的基础上开展车辆维修。2005 年 3 月总装备部又启动了坦克发动机的再制造试验研究工作。

2003 年 8 月,在温家宝总理亲自主持下,科技部和中国工程院在制定我国 2020 年中长期科学技术发展规划第三主题《制造业发展科技问题研究》时,将“机械装备的自修复与再制造”列为十九项关键技术之一,由装备再制造技术国防科技重点实验室负责论证。2004 年 7 月,温家宝总理听取了主题汇报并基本表示肯定。2004 年 9 月,再制造与自修复已作为制造领域的优先发展主题和关键技术进入正在拟定中的《国家中长期科技发展规划纲要》。

2004 年 12 月,经总装备部批准,装甲兵工程学院成立了“装备再制造工程系”,这是我国第一个再制造工程专业系。

2005 年 3 月 1 日,根据全国人大常委会副委员长路甬祥的指示,中国机械工程学会、中国汽车工程学会等四大学会 150 余位领导、专家到装甲兵工程学院参观再制造的发展情况。国家发改委领导也专程出席。我做了《发展再制造工程,建设节约型社会》的专题报告。

3.3 再制造工程能够创造巨大价值的原因

(1) 机器各部件的使用寿命不相等

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表面的使用寿命也不相等。

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。不与腐蚀介质接触的表面使用寿命长,而与腐蚀介质直接接触的表面使用寿命短。这种各零部件的不等寿命性和零件各工作表面的不等寿命性,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通过再制造加工继续使用,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。

表 1 和图 3 是对废旧斯太尔发动机各零部件损坏情况的检测分析结果。表 1 中把废旧发动机的零件分为三类,即可直接再利用的、经过再制造加工后可以再使用的以及当前只能通过再循环作为原材料使用的。

由表 1 可以看出,一台废旧斯太尔发动机以零件数量分析,85.7%的零件都具有继续使用的条件,而它们的价值占了 90.1%。

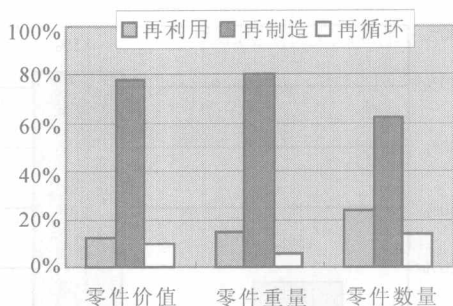


图3 发动机三种资源化形式所占比例图

表1 发动机三种资源化形式所占比例

	再制造	再制造	再循环
零件价值	12.3%	77.8%	9.9%
零件重量	14.4%	80.1%	5.5%
零件数量	23.7%	62.0%	14.3%

(2) 可再制造产品中蕴含有高附加值

一部机器、一个零件制造时的成本，由原材料成本、制造时的劳动力成本、能源消耗成本和设备工具损耗成本构成。其中，后三项成本称为相对于原材料成本的成品附加值(图4)。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%(图5)。

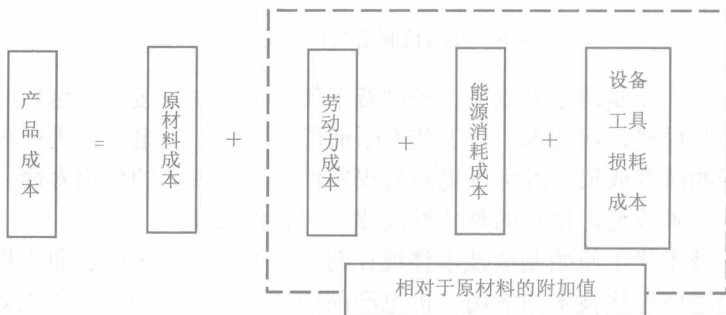


图4 产品附加值分析

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6。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11.1%~20%。

(3) 再制造技术优于原始制造

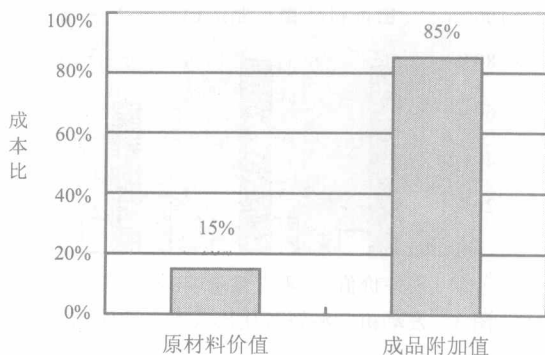


图5 发动机成本分析

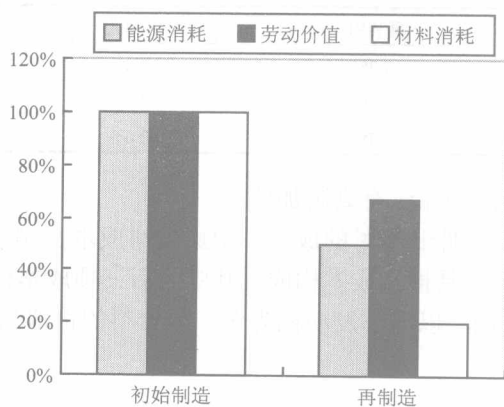


图6 发动机制造与再制造消耗对比

一部机电产品制造出来以后，经过若干年后才达到报废，而这期间科学技术迅速发展，新材料、新技术、新工艺不断涌现，对废旧机电产品进行再制造时可以吸纳最新的研究成果，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体现在两个方面，一是先进表面工程技术的应用，二是先进信息化技术的应用。机电产品的故障往往是个别零件失效造成的，而零件失效往往是由于局部表面造成的，腐蚀从零件表面开始，摩擦磨损在零件表面发生，疲劳裂纹由零件表面向里延伸。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，已在传统的单一表面工程技术基础发展了复合表面工程技术，进而又发展到以微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，纳米表面工程中的纳米电刷镀、纳米等离子喷涂、纳米减摩自修复添加剂等已进入到实用化阶段，纳米表面工程技术在再制造产品中的应用使零

件表面的耐磨、耐蚀、抗疲劳等性能大幅度提高,成为再制造中的关键技术之一。

机电产品被淘汰除了因磨损、腐蚀造成的失效外,还有个重要原因就是其信息化程度太低,远远落后于时代的快速发展。此时产品虽然仍具有完整的机械、力学等性能,但由于无法进行精密控制、智能加工等高新要求,不得不被淘汰。在这种情况下,通过再制造性能升级改造,将落后的信息化系统改造升级为所在时代最先进的系统,就会使面临淘汰的机电产品重获生命力。

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和信息化技术等,使得再制造产品的性能不断提升、成本不断下降,以赢得用户的信赖,增强市场竞争力。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。

上述技术差别,成为再制造产品的性能可以达到甚至超过新品的主要原因。

4 再制造关键技术的应用

4.1 纳米电刷镀技术在再制造中的应用

电刷镀技术具有设备轻便、工艺灵活、镀覆速度快、镀层种类多等优点,被广泛应用于机械零件表面修复与强化,尤其适用于现场及野外抢修。纳米电刷镀就是在镀液中添加特种纳米颗粒,使得刷镀层性能显著提高的新型电刷镀技术。电刷镀技术采用专用电源设备,电源正极接镀笔,电源负极接工件。镀笔通常采用高纯细石墨块作阳极材料,石墨块外面包裹上棉花和耐磨的漆棉套。

装备再制造技术国防科技重点实验室分别研究了镍基含氧化铝、氧化硅、碳化硅、氧化钛和金刚石纳米颗粒的五种复合刷镀层(分别记为 $n\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{Ni}$ 、 $n\text{-SiO}_2/\text{Ni}$ 、 $n\text{-SiC}/\text{Ni}$ 、 $n\text{-TiO}_2/\text{Ni}$ 和 $n\text{-Diam}/\text{Ni}$)。图 7(a)、(b)分别为普通快速镍刷镀层和添加了纳米氧化铝($n\text{-Al}_2\text{O}_3$)颗粒的镍基复合刷镀层的表面形貌^[17],可见后者表面更细密,说明纳米颗粒可以显著细化刷镀层组织,大幅度增加刷镀层晶界,从而有效阻碍位错的移动和微裂纹的产生与扩展,使得刷镀层得到强化。图 7(c)给出了 $n\text{-Al}_2\text{O}_3/\text{Ni}$ 复合刷镀层的 TEM 组织,箭头所指颗粒相为 $n\text{-Al}_2\text{O}_3$ 颗粒。可见纳米颗粒均匀弥散分布在复合刷镀层中,并与镀层中其它物质紧密结合^[18]。

力学性能测试和磨损试验表明,纳米 Al_2O_3 颗粒复合电刷镀层的显微硬度比传统快速镍刷镀层提高 1.5~1.7 倍,耐磨性能比传统快速镍刷镀层提高 1.6~2.5 倍,抗接触疲劳寿命由 10^5 周次提高到 10^6 周次,服役温度由 200°C 提高到 400°C 。

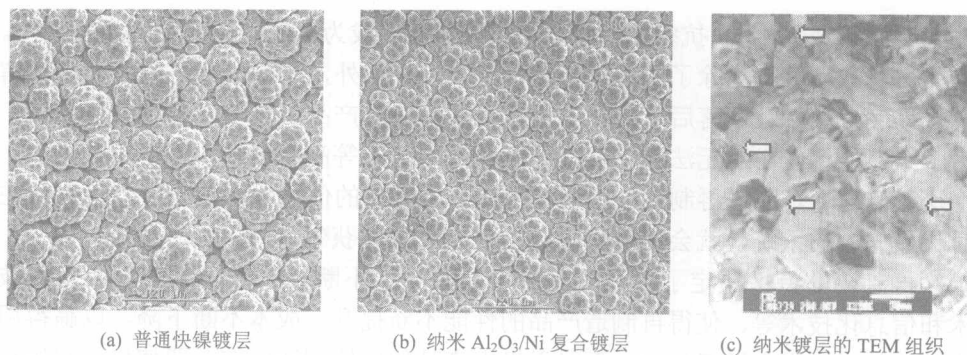


图7 电刷镀镀层表面形貌及 TEM 组织

纳米电刷镀技术成功地用于进口飞机发动机关键零部件的失效修复。300 h 台架试验表明,修复效果完全满足考核要求,扭转了该零部件维修技术和维修材料完全依赖进口的被动局面,每修复 100 台发动机将节省维修经费 5000 余万元。该技术已通过鉴定,被批准用于此类发动机关键零部件的批量修复,创造了重大效益。纳米电刷镀技术还解决了舰船等关键零部件的维修难题,修复了船舶进口设备中直径达 470 mm 的密封装置滑环内表面,使其防腐、耐磨性能大幅度提高。纳米颗粒复合电刷镀技术用于废旧机床导轨磨损面的高性能修复,为部队完成了 100 余台废旧机床的再制造,取得了重要的军事和经济效益。

4.2 等离子喷涂技术在再制造中的应用

等离子喷涂是 20 世纪 70 年代发展起来的一种新型喷涂技术,以等离子弧为热源。等离子弧是一种高能密束热源,电弧在等离子喷枪中受到压缩,能量集中,弧柱中心温度可达 30000℃。等离子喷涂可喷涂难熔金属及陶瓷。图 8 为等离子喷涂示意图。

在 20 世纪 80 年代前期,利用等离子喷涂的方法对重载车辆行星框架进行了再制造修复^[19],取得了良好的效益。因磨损超差而失效是重载车辆行星框架密封环配合面失效的主要形式。由于重载车辆行星框架密封环配合面为薄壁件,若采用堆焊修复将引起薄壁件变形而无法使用,根据当时的维修标准,重载车辆行星框架密封环配合面在经一个中修期(4000 km)后即报废。在这种情况下,利用热源集中、对材料变形影响很小的等离子喷涂技术对行星框架密封环配合面进行了喷涂处理,再制造后的行星框架经过三个中修期(12000 km)的连续实车考核,其密封环配合面仍能继续工作。再制造重载车辆行星框架的成本仅为新品的 10%,而材料消耗更少,仅为 1/900。行星框架见图 9,数据对比见表 2。

4.3 高速电弧喷涂技术在再制造中的应用

高速电弧喷涂(High velocity arc spraying)技术是在传统电弧喷涂(Traditional velocity arc spraying)技术基础上发展起来的一种新型电弧喷涂技术^[20]。高速电弧