

中国再制造工程及其进展*

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: 再制造工程是废旧机电产品高技术修复改造的产业化, 是循环经济和节能环保产业的重要技术支撑。中国的再制造工程经历了产业萌生、科学论证和政府推进三个阶段。中国特色的再制造主要基于尺寸恢复和性能提升, 并以先进的寿命评估技术、纳米表面工程和自动化表面工程技术为支撑, 其重要特征是再制造产品的质量和性能不低于原型新品, 成本为新品的 50 %, 节能 60 %, 节材 70 %, 显著改善环保。具有中国特色的再制造模式已逐渐形成, 并取得了重要成果。

关键词: 再制造工程; 中国特色; 产业化; 关键技术

中图分类号: TH16; TH17

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2010)02-0001-06

Remanufacture Engineering and Its Development in China

XU Bin-shi

(National Key Laboratory for Remanufacturing, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072)

Abstract: Remanufacturing engineering is the industrialization of high technology maintenance to the waste productions, and important technology support of circular economy and energy saving & environmental protection industry. The remanufacturing engineering in China has developed across three periods, namely industrial emergence, scientific demonstration and governmental promotion. Based on performance improvement method and size restitution method, Chinese Characteristic Remanufacturing Engineering takes advanced nano surface engineering and automated surface engineering technologies as the key remanufacturing technologies, and the main character of which is that the performance and quality of remanufacturing products are at least as good as the new ones, and cost at 50 %, energy saving 60 %, material saving 70 %, and which will improve environmental protection obviously. The new remanufacturing mode with Chinese character has gradually established and obtained the great achievements.

Key words: remanufacturing engineering; Chinese character; industrialization; key technology

0 引 言

进入21世纪, 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^[1,2]。

再制造工程, 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, 以综合利用信息技术、纳米技术、生物技术等高新技术为核心, 充分体现了具有中国特色自主创新的特

点。再制造可使废旧资源中蕴含的价值得到最大限度的开发和利用, 缓解资源短缺与资源浪费的矛盾, 减少大量的失效、报废产品对环境的危害, 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。再制造工程高度契合了国家构建循环经济的战略需求, 并为其提供了关键技术支撑, 大力开展再制造工程是实现循环经济、节能减排和可持续发展的主要途径之一^[3,4]。

1 中国特色的再制造工程的内涵与特征

欧美等国的再制造是在原型产品制造工业基础上发展起来的, 目前主要以尺寸修理法和换件修理法为主。随着科技迅速发展, 这种再制造模式存在以下三方面的问题: 一是旧件再制造率低, 节能节

收稿日期: 2009-12-26; 修回日期: 2010-03-26

基金项目: *国家自然科学基金重点项目 (50735006); 国家973计划项目 (2007CB607601); 国家科技支撑计划项目 (2008BAK42B03)

作者简介: 徐滨士(1931—), 男(汉), 哈尔滨市人, 中国工程院院士。

材的效果差；二是难以提升再制造产品的性能；三是加工量大，环保效果不佳^[5]。

中国特色的再制造工程可以简单概括为：再制造是废旧产品高技术修复、改造的产业化。中国特色的再制造工程是在维修工程、表面工程基础上发展起来的，主要基于寿命评估技术、复合表面工程技术、纳米表面技术和自动化表面技术，这些先进的表面技术是国外再制造时所不曾采用的。其重要特征是再制造产品的质量和性能不低于新品，成本只有新品的50%，节能60%，节材70%，对环境的不良影响与制造新品相比显著降低。先进表面工程技术在再制造中的应用，可将旧件再制造率大幅度提高（以斯太尔发动机为例，再制造率可提高到92%），使零件的尺寸精度和质量性能标准不低于原型新品水平，而且在耐磨、耐蚀、抗疲劳等性能方面达到原型新品水平，并最终确保再制造装备零部件的性能质量达到甚至超过了原型新品。

2 中国再制造的发展历程及面临的任务

笔者1999年起大力宣传并深入研究再制造工程。10年期间，我国仅有的几个再制造企业由最初面临重重困难、各项工作难以开展，发展到目前国家政府机关、行业领域和社会各界的广泛认可与大力支持。由于再制造是落实国家节约资源、节省能源和发展循环经济的重要举措，因而前景广阔；特别是再制造在落实全球可持续发展战略方面发挥了重要作用，因而备受国际发达国家广泛关注。

我国的再制造发展经历了3个主要阶段。

第一阶段是再制造产业萌生阶段。自上世纪90年代初开始，我国相继出现了一些再制造企业，如中国重汽集团济南复强动力有限公司（中英合资）、上海大众汽车有限公司的动力再制造分厂（中德合资）、柏科（常熟）电机有限公司（港商独资）、广州市花都全球自动变速箱有限公司（侨资）等，分别在重型卡车发动机、轿车发动机、车用电机，以及车用变速箱等领域开展再制造。产品均按国际标准加工，质量符合再制造的要求。但是，为取缔汽车非法拼装市场，2001年国务院307号令规定旧汽车五大总成一律回炉，切断了这些企业再制造毛坯来源，产量严重下滑。

第二阶段是学术研究、科研论证阶段。

1999年6月，笔者在西安召开的“先进制造技术”国际会议上发表了“表面工程与再制造技术”的学术论文，在国内首次提出了“再制造”的概念；同年12月，在广州召开的国家自然科学基金委机械学科前沿及优先领域研讨会上，“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^[6]。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，笔者发表了题为“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维修学术会议上首次发表“再制造”论文；同年12月，中国工程院咨询项目《绿色再制造工程在我国应用的前景》研究报告引起了国务院领导的高度重视，并被批转国家计委、经贸委、科技部、教育部、国防科工委、铁道部、信息产业部、环保总局、民航总局等国务院领导机关参阅^[7]。2001年5月，总装备部批准立项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，于2003年6月正式投入使用。2002年9月及2007年9月，国家自然科学基金委先后批准了两项关于再制造基础理论与关键技术研究的重点项目；2003年8月起，国务院温家宝总理组织了2000多位科学家从国家需求、发展趋势、主要科技问题及目标等方面对“国家中长期科学和技术发展规划”进行了论证研究，其中第三专题《制造业发展科学问题研究》将“机械装备的自修复与再制造”列为19项关键技术之一。2003年12月，中国工程院咨询报告《废旧机电产品资源化》完成，研究结果表明，废旧机电产品资源化的基本途径是再利用、再制造和再循环，其目标是使再利用、再制造的部分最大化，使再循环的部分最小化，使安全处理的部分趋零化。2004年9月，美国再制造产业网站报道了一条题为“再制造全球竞争—中国正在迎头赶上”的新闻，介绍了再制造在中国的发展状况，并且预言中国将成为美国在再制造领域最强劲的全球竞争对手^[8]。2006年12月，中国工程院咨询报告《建设节约型社会战略研究》中把机电产品回收利用与再制造列为建设节约型社会17项重点工程之一。

通过上述多角度的深入论证，为政府决策提供了科学依据。

第三阶段是人大颁布法律、政府全力推进阶段。

2005年6、7月间，国务院颁发的21、22号文件均明确指出国家“支持废旧机电产品再制造”，并

“组织相关绿色再制造技术及其创新能力的研发”。同年11月,国家发改委等6部委联合颁布了“关于开展循环经济试点(第一批)工作的通知”,其中再制造被列为四个重点领域之一,我国发动机再制造企业“济南复强动力有限公司”被列为再制造重点领域中的试点单位。2006年,前国务院曾培炎副总理就发展我国汽车零件再制造产业做出批示:“同意以汽车零部件为再制造产业试点,探索经验,研发技术。同时要考虑定时修订有关法律法规”。2008年,国家发改委组织了“全国汽车零部件再制造产业试点实施方案评审会”,对全国各省市40余家申报单位中筛选出来的14家汽车零部件再制造试点企业进行了评审,包括一汽、东风、上汽、重汽、奇瑞等整车制造企业和潍柴、玉柴等发动机制造企业纷纷开始实施再制造项目。2009年1月,《中华人民共和国循环经济促进法》正式生效,第2、第40、第56条中六次阐述再制造,为推进再制造产业发展提供了法律依据。2009年4月,国家发改委组织“全国循环经济座谈会暨循环经济专家行启动仪式”,笔者向李克强副总理汇报我国再制造产业发展现状与对策建议,受到李克强副总理高度重视,他指出“今后要大力推进再制造新兴产业,建议把汽车零部件再制造进一步扩大到机床、工程机械等领域,同时注重再制造与改造相结合;并建议实施汽车下乡工程与再制造生产相结合,促进形成新的产业链”。2009年12月,中共中央政治局常委、国务院总理温家宝对再制造作出重要批示,高度肯定再制造产业非常重要,认为再制造不仅关系循环经济的发展,而且关系扩大内需(如家电、汽车以旧换新)和环境保护;同时温总理还认为再制造产业链条长,涉及政策、法规、标准、技术和组织,是一项比较复杂的系统工程。2010年2月20日,国家发改委和国家工商管理总局确定启用汽车零部件再制造产品标志,目的在于更好地加强对再制造产品的监管力度,进一步推进汽车零部件再制造产业的健康发展。2010年3月13日,第十一届全国人大三次会议新闻中心专门安排了主题为“再制造与汽车产业的可持续发展”的集体采访活动。

上述法律条款以及党和国家领导人的指示精神,为再制造的发展注入了强大动力。可以说,我国已进入到以国家目标推动再制造产业发展为中

心内容的新阶段,国内再制造的发展呈现出前所未有的良好发展态势。

机遇与挑战并存。在国家宏观政策为再制造的发展提供重大机遇的同时,今后的任务仍很繁重。在大众认识层面,再制造作为一个新的理念还没有被人们广泛认识,消费者没有真正认识到使用再制造产品的好处,不少制造企业对发展再制造产业积极性不高,没有看到再制造对企业可持续发展的深远影响;在物流回收层面,目前我国仍然强制规定报废汽车五大总成必须回炉冶炼,这些政策切断了再制造企业原旧件的来源,是当前制约再制造产业发展的“瓶颈”;在关键技术层面,当前以发动机再制造为主要应用对象的关键技术无法完全满足短期内迅速扩展的各个再制造行业(如工程机械、机床等再制造)对再制造关键技术的多层次需求;在再制造模式层面,国内还有相当多的再制造企业,因引进国外再制造生产线,故仍简单地套用着国外的尺寸修理模式和换件修理模式,对具有中国特色的“尺寸恢复、性能提升”模式认识不足;在中试平台层面,由于缺乏中间转换环节,如国家工程中心、再制造中试基地等,实验室里研发的再制造关键技术未经中试,直接应用于再制造工厂的生产线,影响了生产效率和可靠性;在监管方面,还没有相应的市场准入制度来对再制造企业管理,尚未全面实行再制造企业认证、产品标识、产品信息备案等制度。未来的几年中,必须迎难而上,应对挑战,突破瓶颈,切实落实好温总理的指示精神,牢牢抓住再制造发展难得的大好机遇,实现再制造的重大突破。

3 自主创新的中国特色的再制造模式及成果

再制造的基础理论和关键技术研究主要从上世纪末开始研究与实践,目前已经形成了“以高新技术为支撑,以恢复尺寸、提升性能的表面工程技术为手段,产学研相结合,既循环又经济”的中国特色的再制造模式。

该模式注重基础研究与工程实践结合,创新发展了中国特色的再制造关键技术,构建了废旧产品的再制造质量控制体系,保证了再制造产品性能质量和可靠性;注重企业需求与学科建设融合,提升企业与实验室核心竞争力;注重社会效益与经济效益兼顾,促进国家循环经济建设。

3.1 再制造模式的主要特色

(1) 技术手段的集约性。再制造是由维修工程和表面工程发展而来,又结合了力学、摩擦学、材料学等多学科理论,因此再制造的技术手段体现了集约性,既有传统的作为主体的维修技术、表面工程技术,又是新兴的无损检测、寿命评估预测、质量控制等先进技术。

(2) 节能环保的实效性。中国特色再制造模式不同于国外换件修理和尺寸修理模式的主要创新在于引入了先进的表面工程技术作为再制造的主要技术手段,通过表面工程技术对零件的局部损伤进行“加法”修复,以恢复并提升零件的性能,最大限度地挖掘了废旧零件中蕴含的附加值,避免了回炉和再成形等一系列加工中的资源能源消耗和环境污染。

(3) 基础研究的前瞻性。采用超声波、涡流检测、金属磁记忆等无损检测技术与模拟评估手段,创新性地进行了国际前沿的再制造寿命评估基础研究,为再制造产品性能达到或超过原型新品奠定了坚实的理论基础。

(4) 关键技术的先进性。将自主研发的先进表面工程、纳米技术和自动化技术用于再制造生产,大大提升了再制造的品质,不仅使再制造产品的性能达到甚至超过新品,而且对资源、能源的节约和对环境的保护效果更为优异。现已成功开发了再制造寿命评估仪器及软件、自动化纳米电刷镀设备、自动化高速电弧喷涂设备、自动化等离子熔覆设备和智能纳米减摩自修复添加剂技术等,应用效果表明,先进表面工程技术在发动机再制造中的推广应用,大大提高了旧件利用率,降低了再制造成本,不仅使工厂获得了经济效益,还为国家节能、节材及保护环境做出了重要贡献。

(5) 工程应用的先导性。通过产学研的联合攻关为我国再制造企业提供了重要技术支撑。目前已形成了具有中国特色的再制造工程,引领着我国再制造技术的发展方向,并在国际上占有重要的一席之地。

3.2 再制造模式的基础理论研究成果

(1) 拓展了产品全寿命周期理论,提出了再制造循环寿命周期理论

产品的全寿命周期是指产品从设计、制造、使

用、维修到报废所经历的全部时间,其特征是“研制-使用-报废”,其物流是一个开环系统;再制造的出现,完善了全寿命周期的内涵,使得产品在全寿命周期的末端,即报废阶段,不再作为废品报废,而是依靠高新技术恢复性能、重新焕发生命力,此时全寿命周期的特征已转变为“研制-使用-报废-再生”,其物流已成为一个闭环系统^[9]。因此,再制造是对产品全寿命周期的延伸和拓展,赋予了废旧产品新的寿命,形成了再制造产品的循环寿命周期。再制造不仅可使废旧产品起死回生,还可很好地解决资源能源节约和环境污染问题。

(2) 创新了再制造寿命评估理论,确保了废旧产品的再制造质量基础前提和再制造产品的质量保证体系

再制造寿命评估包含再制造前的再制造毛坯(废旧零部件)寿命评估和再制造后的再制造产品(再制造零部件)寿命预测两部分内容。其中,废旧零部件寿命评估是通过废旧零件的剩余寿命评估,回答废旧零部件能否再制造、能再制造几次(剩余疲劳寿命是否足够)的问题,是保证再制造毛坯质量的重要途径。再制造产品寿命预测是通过再制造产品表面涂层质量和服役寿命评估,保证再制造产品性能不低于新品。

再制造零部件疲劳损伤规律。研究提出疲劳寿命是机械零部件寿命的核心,深入研究了典型零部件疲劳损伤累积、疲劳应力集中裂纹萌生和扩展规律;并借助涡流检测、超声检测、金属磁记忆检测多种无损检测技术手段,实现零部件内部和表面应力集中与裂纹的无损检测,为再制造毛坯剩余寿命评估提供了检测技术和理论指导^[10]。

再制造毛坯剩余寿命无损评估理论。创新性利用金属磁记忆对再制造毛坯剩余寿命评估进行探索研究,发现了金属磁记忆信号与废旧零部件所受疲劳载荷大小与历史、残余应力和应力集中之间的关系以及废旧零部件磁畴与载荷和磁记忆信号之间的关系,初步构建出表征铁磁性废旧零部件疲劳裂纹萌生寿命模型及裂纹扩展寿命模型,并初步实现了发动机气门杆、连杆、曲轴等重要零部件损伤和寿命的检测评估,为再制造质量控制提供了理论基础。

再制造产品寿命预测理论。再制造产品的结构

疲劳寿命以原结构件疲劳寿命为基础。重点攻克了再制造涂层接触疲劳寿命和磨损寿命预测理论,并指出再制造涂层接触疲劳寿命与原结构基体材料密切相关。创新性地将实验力学和声发射理论进行综合集成,通过解决典型声发射信号特征参量的甄选及其指代信息分析,获得真实准确的反映再制造零件表面涂层内部微裂纹萌生、扩展及断裂等实验力学信息,初步实现对再制造零件表面涂层寿命演变规律的把握,建立了再制造零件涂层的抗接触疲劳损伤失效模型。

再制造产品台架试验及实车考核。在实验室研究结果基础上,针对在选定的再制造材料、工艺和技术规范下获得的再制造零部件,通过台架试验和实车考核,对再制造产品进行整体综合评价,获得充足的剩余寿命实车考核数据,确保再制造产品能够重新服役一个完整的寿命周期。

(3) 提出了再制造性和再制造率的概念,完善了产品的再制造评价体系

再制造性是废旧产品能否进行再制造的重要属性,它是指在规定的条件及时间内使用的产品退役后,综合考虑技术、环境等因素后,在达到规定性能时,通过再制造获取原产品价值的能力。目前已初步构建起了再制造性函数、再制造费用的统计分布模型、系统再制造费用分析计算模型等。

衡量再制造对节能节材的重要指标是废旧零件再制造率的高低,国际通常采用计重法统计,我们创新提出计重再制造率、计价再制造率、数量比再制造率、价值比再制造率等多维评价指标体系。

3.3 再制造模式的关键技术与工程实践成果

由于再制造使用的是经过长期服役而报废的各种成形零件,其损伤失效形式复杂多样,残余应力、内部裂纹和疲劳层的存在导致寿命评估与服役周期复杂难测,再制造还要在保持废旧零(部)件材质和形状基本不变的前提下,采用高技术恢复原产品的尺寸标准、达到或超过原产品的性能指标、实现原产品的功能升级,同时也采用正规化、规模化的加工手段,因此加工工艺更为复杂。

再制造寿命检测的核心是疲劳寿命,再制造质量控制的关键是裂纹控制,再制造的主要损伤形式是表面磨损。实验室根据再制造产品失效特征和质量性能不低于新品的标准要求,通过多年研究与实

践,自主创新了多项中国特色的再制造技术。

(1) 自动化纳米颗粒复合电刷镀技术

纳米电刷镀技术是自主研发的一项先进的再制造技术,纳米刷镀层与不含纳米颗粒的金属刷镀层相比,耐磨性能提高1.5倍、抗温性由200℃提高到400℃、抗接触疲劳性能由 10^5 周次提高到 10^6 周次,显著延长零件使用寿命,并成功应用于飞机发动机叶片、汽车发动机连杆、凸轮轴和缸体的再制造^[11]。但由于手工纳米电刷镀生产效率低、劳动强度大,针对重载汽车发动机连杆和缸体缸筒再制造难题和产业化生产需求,自主研发了发动机连杆自动化纳米电刷镀专用设备和气缸筒自动化纳米电刷镀专用设备,实现了镀液连续供应和循环利用、纳米电刷镀再制造工艺过程综合监控。生产应用表明,生产率提高5~10倍,再制造消耗材料仅为该零件本体重量的1~2%,费用是新品价格的1/10,实现了废旧零件再制造的需求。并且镀液循环利用,废水集中处理,实现全过程的绿色化要求。

(2) 纳米减摩智能自修复添加剂技术

研制的摩擦副损伤原位自修复添加剂已在济南复强动力有限公司的设备、及发动机台架上进行试车考核试验,同时在安徽定远进行了实车试验。试验结果证明,该技术可实现对早期磨损表面的轻度微损伤进行原位动态自修复,对零件表面形貌进行优化,显著提高零件表面硬度和光洁度,进而改善润滑状况,延长零部件的使用寿命,并节约燃油3%~7%,降低润滑油温度40%,显著延长换油周期,节能减排效果明显。

(3) 自动化高速电弧喷涂技术

自主研发了自动化高速电弧喷涂技术,采用机器人或操作机的操作臂夹持喷枪,通过红外温度场监测和编程控制高速电弧喷枪实现各种规划路径,实时反馈调节喷涂工艺参数,实现自动喷涂作业的智能控制。该技术结合新开发的FeAl和FeAlMn系粉芯丝材制备出的喷涂层,结合强度高,硬度高,耐磨损性能好,已成功应用于废旧斯太尔发动机缸体的再制造,已完成再制造量200多台。采用自动化电弧喷涂技术再制造单件发动机缸体时间由手工的1.5小时缩短为20分钟,喷涂效率提高4.5倍。

(4) 自动化微束等离子熔覆技术

自主创新设计了70 KHz高频逆变微束等离子电

源,高于目前通常采用的20 KHz逆变频率,从而减少了设备的体积,提高了系统的响应特性,使得微束等离子弧的工作更加稳定。利用该技术对发动机废旧排气门密封锥面进行再制造后的气门变形量小,表面硬度恢复到新品数值,力学性能满足要求,成本仅为新品的1/5。

(5) 再制造无损检测评估技术及其仪器设备

废旧零部件损伤状态无损检测与评估是再制造质量控制体系的重要内容。研究了汽车发动机缸体、曲轴、连杆、气门杆等不同再制造零部件的多种无损检测评估技术(涡流、超声、金属磁记忆、声发射等),并研制出了高频涡流无损检测仪(气门杆、连杆等,通用性强)、高穿透力超声无损检测仪(曲轴等,通用性强)、缸体涡流/磁记忆综合无损检测评估仪、金属磁记忆寿命评估仪、纳米复合刷镀层无损测厚仪等,初步实现了发动机连杆、曲轴、发动机缸体等重要零部件损伤和无损检测评估,为再制造产品质量不低于新品的质量控制体系提供了有力保障。相关技术和仪器设备已在济南复强动力有限公司再制造生产线上应用试验,为再制造毛坯质量控制体系提供了技术支撑。

4 结 论

(1) 再制造是废旧产品高技术修复、改造的产业化。再制造的重要特征是再制造产品质量和性能不低于新品,有些还能超过新品,成本只是新品的50%,节能60%,节材70%,对环境的不良影响显著降低。再制造是实现循环经济和节能减排的重要手段。

(2) 再制造是在维修工程的基础上发展起来的,是维修发展的高级阶段;再制造也是先进制造的新形式,是一种以节约资源、保护环境为特色的新兴产业。再制造与维修和制造既有联系又有明显区别,再制造具有更复杂的理论与技术要求和更优异的节能减排效益。

(3) 由于产品在设计阶段被赋予的冗余寿命较大,为实施再制造提供了物质基础,为再制造提供了节能环保的空间;再制造技术可重新赋予报废零件新的寿命;废旧产品中蕴含着的高附加值可以通过再制造而保留;由于再制造能够非常灵活地吸纳、应用最新技术,使得再制造产品的性能大大提高。

(4) 以表面工程技术为代表的再制造的支撑技

术具有鲜明的中国特色。目前开发了纳米表面工程技术、自动化表面工程技术、运行中的自修复添加剂技术等。再制造所具有的优异节能减排效果是依赖先进的再制造技术实现的。

(5) 国家领导高度重视再制造产业发展,指出再制造是发展循环经济、扩大内需和环境保护的重要途径。装备再制造技术国防科技重点实验室的创造性工作为国家的再制造发展战略提供了重要支撑,发挥了引领和不可替代的作用。

参考文献:

- [1] 徐匡迪. 工程师—从物质财富的创造者到可持续发展的实践者 [J]. 中国表面工程, 2004, 17(6): 1-6.
- [2] 邢忠, 姜爱良, 谢建军. 汽车发动机再制造效益分析及表面工程技术的应用 [J]. 中国表面工程, 2004, 17(4): 1-5.
- [3] 徐滨士, 朱胜, 马世宁, 等. 装备再制造工程学科的建设与发展 [J]. 中国表面工程, 2003, 16 (3): 1-6.
- [4] 徐滨士, 刘世参, 王海斗. 大力发展再制造产业 [J]. 求是, 2005, (12): 46-47.
- [5] Xu Binshi, Zhu Sheng. Advanced remanufacturing technologies based on nano-surface engineering [J]. Proc. 3rd Int. Conf. on Advances in Production Eng, 2004: 35-43.
- [6] 徐滨士, 马世宁, 刘世参, 等. 绿色再制造工程设计基础及其关键技术 [J]. 中国表面工程, 2001, 14(2): 12-15.
- [7] 徐滨士. 绿色再制造工程及其在我国应用的前景 [R]. 中国工程院咨询报告, 2000.
- [8] 国家自然科学基金委员会工程与材料科学部. 机械与制造科学 [M]. 北京: 科学出版社, 2006. 373-398.
- [9] 徐滨士. 装备再制造工程的理论与技术 [M]. 国防工业出版社, 2007.
- [10] 徐滨士, 刘世参, 史佩京, 等. 再制造工程的发展及推进产业化中的前沿问题 [J]. 中国表面工程, 2008, 21(1): 1-6.
- [11] Xu Binshi. The remanufacturing engineering and automatic surface engineering technology [J]. Key Engineering Materials, 2008, 373-374: 1-10.

作者地址: 北京市丰台区杜家坎 21 号

100072

Tel: (010) 66717145

E-mail: xubinshi@vip.sina.com