

## 绿色制造与再制造技术研究与发展\*

张 伟, 刘仲谦, 张 纾, 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:** 简要概述了绿色制造和再制造技术的内涵, 国内外技术发展概况、存在问题, 并针对我国国情初步提出未来发展重点和建议。

**关键词:** 绿色制造; 再制造; 可持续发展

中图分类号: TH16; TH17

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289-(2006)05<sup>+</sup>-0076-06

### Study and Development of Green Manufacturing and Remanufacturing

ZHANG Wei, LIU Zhong-qian, ZHANG Shu, XU Bin-shi

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

**Abstract:** Definition and connotation of Green manufacturing and remanufacturing was introduced. Status in quo and problem of development and research was presented. To combine the situation of our country, the emphasis of future development in this field were suggested primary.

**Key words:** green manufacturing; remanufacturing; sustainable development

## 0 引 言

制造业是国民经济的物质基础和产业主体, 是国家竞争力的主要体现, 也是国家安全的重要保障。为适应可持续发展和构建循环经济的要求, 制造业必须从原有的面向利润、面向成本的制造模式, 转变为既面向利润、面向成本, 又面向环境、面向资源的制造模式, 即“绿色制造”。再制造又是绿色制造的重要组成部分, 是维修的高技术发展。国发[2005]21号文件指出: “国家科技计划继续加大对节约资源和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...重大机电产品节能降耗技术、绿色再制造技术...”; 国发[2005]22号文件在发展循环经济的“重点环节”第四条中指出“再生资源产生环节要大力回收和循环利用各种废旧资源, 支持废旧机电产品再制造”。因此, 大力

开展绿色制造和再制造技术研究对落实国家可持续发展战略, 支持我国制造业降低资源能源消耗、减少环境污染、跨越国际绿色贸易壁垒, 推动新兴产业的形成有重要意义和作用。

## 1 绿色制造与再制造

“绿色制造 (Green Manufacturing)”是一种综合考虑环境影响和资源消耗的现代制造模式, 其目标是使产品从设计、制造、包装、使用到报废处理的整个生命周期中, 对环境负面影响小、资源利用率高、综合效益大, 使企业经济效益与社会效益得到协调优化<sup>[1]</sup>。绿色制造过程示意图如图1所示。

绿色制造实质上是人类社会可持续发展战略和循环经济模式在现代制造业中的体现, 其基本思想是实现制造业产品全生命周期资源消耗、环境污染以及人体安全健康危害的减量化和源头控制, 并有利于资源循环再利用。目前是工业发达国家广泛关注的重要技术领域和产业发展方向, 也是我国发展循环经济和建设节约型社会等重大工程的关键支撑技术。

收稿日期: 2006-08-10 修回日期: 2006-09-20

基金项目: \*国家自然科学基金项目 (50575224) 和实验室装备预研基金项目 (编号略)

作者简介: 张伟 (1971-), 男 (汉), 陕西西安人, 教授, 博士。

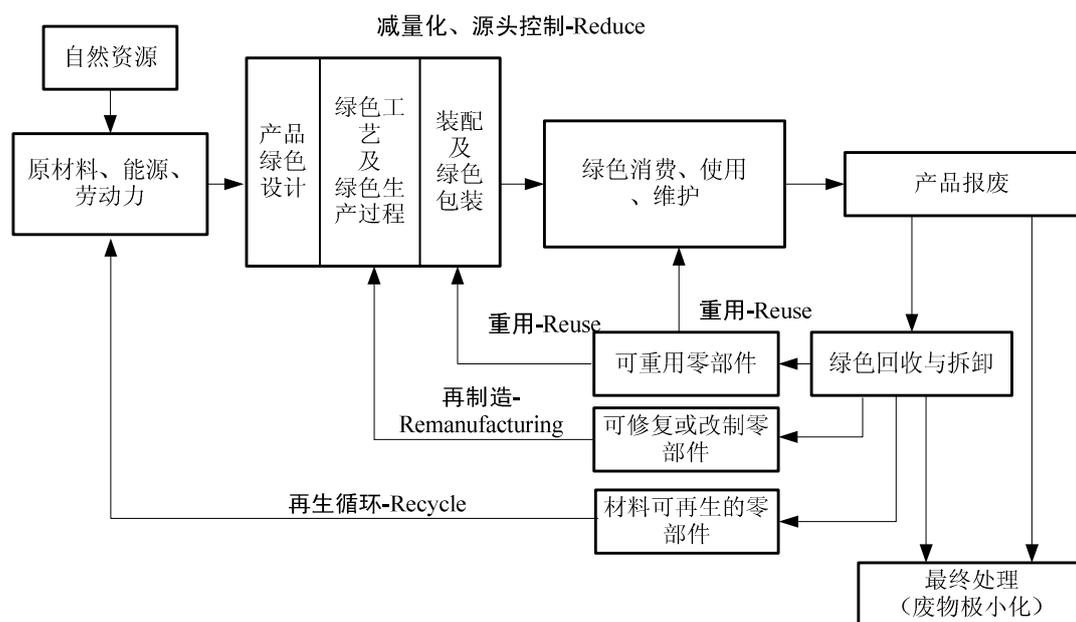


图 1 绿色制造过程示意图

Fig.1 Scheme of green manufacturing process

国外对再制造的简单定义是：将废旧产品制造成“如新品一样好”的再制造产品的再循环过程。我们认为再制造工程是指以装备全寿命周期理论为指导，以废旧装备实现跨越式提升为目标，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，进行修复、改造废旧装备的一系列技术措施或工程活动的总称。简言之，再制造工程是废旧装备高技术修复、改造的产业化<sup>[2]</sup>。

再制造是绿色制造的重要组成，是维修的高技术发展，也是实现绿色制造的重要技术手段和方法。再制造的重要特征是再制造后的产品质量和性能达到或超过新品，成本却只是新品的 50%，节能 60%，节材 70%，对环境的不良影响显著降低。传统的装备全寿命周期是“研制-使用-报废”，其物流是一个开环系统；而再制造装备的全寿命周期是“研制-使用-报废-再生”，其物流是一个闭环系统。

再制造工程包括以下的内容：

(1) 再制造加工——主要针对达到物理寿命和经济寿命而报废的产品，在失效分析和寿命评估的基础上，把有剩余寿命的废旧零部件作为再制造毛坯，采用先进表面技术、快速成形技术、修复热处理等加工技术，使其迅速恢复或超过新品技术性能和应用价值。

(2) 过时产品的性能升级——主要针对已达到技术寿命的产品，或是不符合可持续发展要求的产

品，通过技术改造、更新，特别是通过使用新材料、新技术、新工艺等，改善产品的技术性能、延长产品的使用寿命、减少环境污染。

## 2 我国对绿色制造与再制造的需求

进入 21 世纪，我国正处在工业化高速发展的时期，城市化进程加快，经济规模不断扩大，对资源的需求和消费激增，已经进入了一个高能耗、高原材料消耗的发展阶段，而中国人均资源占有量又远低于世界平均水平。耕地、水资源、森林面积、矿产资源的供求缺口日益凸现，自然环境脆弱，环境质量恶化。应该说我国的发展面临着资源环境的严重约束。针对上述矛盾问题，最根本的对策就是树立科学的发展观，发挥科学技术的作用，走新兴工业化道路，构建和谐、资源节约型和生态保护型社会。为落实“依靠科技进步，建立节约型社会”的基本国策，国家提出了明确的中长期发展奋斗目标，即“十一五”实现人均 GDP 提高 1 倍，单位 GDP 能耗和排放分别降低 20%，10%；2020 年实现人均 GDP 翻两番，单位 GDP 能耗降低 50%。这对我国制造业的绿色制造提出了迫切需求。主要表现在：

(1) 制造业制造过程的能源与资源消耗巨大、环境污染严重。我国已成为“全球的生产制造车间”，制造着全世界 70% 的玩具、自行车和 DVD 播放机，60% 的数码相机和 50% 的笔记本电脑。同

时,每年消耗着世界 1/3 以上的煤炭、棉花和钢铁等。我国制造业的能源消耗占整个工业的 80%,占全国消耗总量的 54%;制造业 SO<sub>2</sub> 排放占全国总排放的 60%。我国制造业资源效率和污染排放与国际先进水平差距较大,制造同样的产品,我国需要使用的能源是欧洲的 3 倍。我国经济消耗钢铁总量是美国的两倍,而经济的总量只有美国的 1/10<sup>[6]</sup>。因此,我国制造业的可持续发展迫切需要绿色制造和再制造技术降低资源消耗和环境污染。

(2) 废旧产品报废数量惊人,大量产品的废弃处理问题急待解决。如 2004 年我国汽车年报废量就约 200 万辆,电视机、电脑、冰箱、洗衣机、手机等产品每年至少报废 500 万台、500 万、400 万台、400 万台、1000 万部;我国目前每年产生约 8 亿吨固体废物,其中废弃计算机主机和显示器的数

量就达到 8~16 万吨。随着科技的发展、人们消费水平的提高、产品更新换代频率的加快,机电产品的年报废数量也将会激增。大量机电产品的报废,造成了严重的现代垃圾污染、资源浪费和安全隐患。此外,在机械装备的全寿命周期费用中,机械装备的后半生(使用、维修、报废)费用占到 50-70%。为缓解资源短缺和资源浪费的矛盾,保护生态环境,最大限度地回收利用废旧产品所蕴含的财富,从产品全寿命出发,将“线性结构”制造模式发展为闭环的“循环型结构”制造模式,在我国大力推动废旧产品资源化,迫切需要加强产品的再制造技术研究,一方面解决废弃产品处理的资源浪费和环境污染问题,另一方面推动产品回收处理和再制造新兴产业的形成。

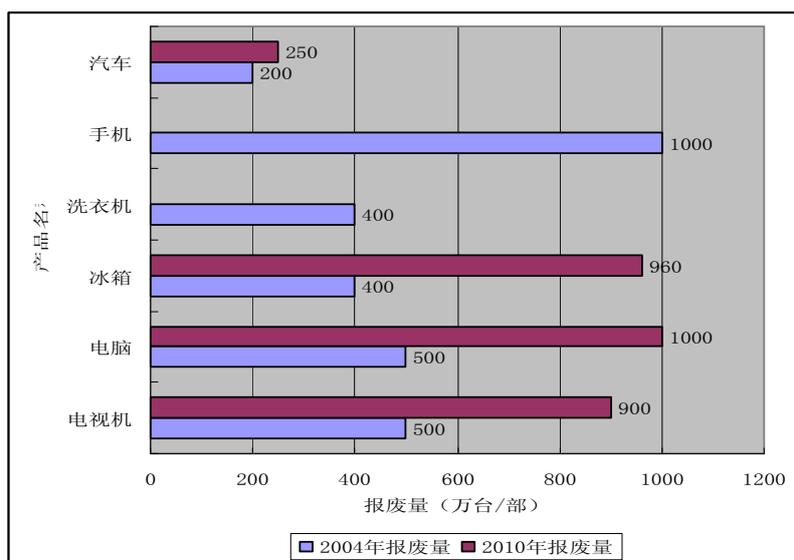


图 2 主要机电产品报废量估计

Fig.2 Estimation of waste machinery and electronic products

### (3) 废旧机电产品带来诸多问题

废旧机电产品如果得不到妥善处置,会对人们的生产生活带来一系列的负面影响,主要表现在以下几个方面:①威胁人类健康。废旧机电产品部分材料中含有对人体有害的化学物质或有害的重金属,给人们的健康带来极大的威胁。例如电脑元器件中含有铅、砷、汞等有害物质,会破坏人的神经、血液系统以及肾脏;②污染自然环境。废旧机电产品中含有的某些有害元素会对环境造成巨大污染。

如电冰箱的制冷剂 CFC-12 和发泡剂 CFC-11 是破坏臭氧层物质;机电产品中的废润滑油会污染土壤和水源。由于缺乏行之有效的资源化处理渠道,目前十有八九的废旧机电产品弃置后都得不到妥善处理,大多混同于一般生活垃圾填埋或暴露于环境中,受到大自然的侵蚀,这都能造成空气、土壤和水质的严重污染,并构成对生态环境的负面影响。③占用大量土地。废旧机电产品随意的堆置,不但破坏了环境的美观,还侵占了大量土地。④构

成安全隐患。由于我国缺乏二手产品质量检测标准和有效的控制措施,使得一些本应报废的废旧机电产品大多数都从经济发达地区流向不发达地区继续使用,不但造成了能源过度浪费、噪声干扰、环境污染等问题,而且很容易引发直接危及人身安全的安全事故。

(4) 制造业面临的国际技术性绿色贸易壁垒形势严峻。如仅欧盟关于废旧电子电气设备指令(WEEE)和关于在电子电气设备中限制使用某些有害物质指令(RoHS)付诸实施后,将造成我国机电产品出口贸易达560亿美元的直接影响,对我国机电产品的制造提出了严峻的挑战。迫切需要通过绿色制造技术来跨越国际绿色贸易壁垒。

由此可见,绿色制造和再制造技术研究将是推动制造业可持续发展的重要途径。

### 3 绿色制造与再制造现状及问题

绿色制造有关内容的研究可追溯到80年代,但比较系统的提出绿色制造的概念、内涵和主要内容的文献是美国制造工程师学会于1996年发表的关于绿色制造的专门蓝皮书《Green Manufacturing》<sup>[3]</sup>。近年来,围绕制造系统或制造过程中的环境问题,已提出了一系列与绿色制造相似、相近或相关的概念,如可持续制造(Sustainable manufacturing)、环境和谐制造(Environmentally Benign manufacturing)、环境意识制造(Environmentally Conscious Manufacturing, ECM)、面向环境的制造(Manufacturing For Environment, MFE)、清洁生产(Cleaner Production)、生态意识制造(Ecologically Conscious Manufacturing)等。目前这些概念内涵有逐渐趋同的倾向,差异越来越小。

#### 3.1 国外技术现状

绿色制造是制造业制造技术和制造模式未来发展的重要方向,将成为未来工业界的重要挑战和竞争领域。在欧洲、日本和美国等工业发达国家,无论是政府、高校、科研院所,特别是有远见的领先企业都非常重视绿色制造的技术研发、立法和宣传,将其列入制造业或本企业的发展战略目标。

1999年,在美国科学基金会(NSF)、能源部(DoE)的资助和国际技术研究院(ITRI)的支持下,来自麻省理工学院、德克萨斯奥斯汀分校、伯克利加州大学、乔治亚理工学院、阿拉巴马大学、

密执根大学和依利诺斯大学的11位绿色制造技术专家对日本、欧洲和美国共55家企业和机构进行了走访,对三个国家和地区的绿色制造政策、技术方面的动因、实施和效果以及竞争优势进行调研和分析,并在2001年出版了最终研究报告<sup>[4]</sup>。

英国LINK计划曾设立Sustainable Technologies Initiative Programme (STI)和Waste Minimization through Recycling, Re-use and Recovery Programme (WMR3)计划。STI计划主要侧重于支持金属加工业的绿色制造技术,试图通过绿色制造技术提升金属加工业的环境友好性和技术先进性,以应对来自远东低成本制造业的冲击。WMR3计划主要研究领域为热固塑料(特别是车辆产品中的热固塑料)、复合材料(如轮胎)以及金属材料(如蕴含于废水或PCB板中的金属)三类材料的回收、重用和修复技术。

目前工业发达国家和国际组织纷纷制定、倡导和出台了很多与绿色制造相关的立法、标准等,如ISO14001环境管理标准体系、OHSAS18001职业健康与安全管理体系、欧盟的ROHS和WEEE指令以及德国“蓝色天使”、美国“能源之星”等产品环境认证标志等等。日本于2000年前后通过了《促进建立循环型社会基本法》、《促进资源有效利用法》以及《家用电器回收法》、《建筑材料回收法》等。这些立法、标准等对产品质量,特别是节能、无毒无害、低排放和可回收等与绿色制造技术相关方面提出了严格的限制,逐步形成了国际贸易之间的绿色壁垒。

国外许多高校也纷纷成立以绿色制造技术研究方向的研究机构,如美国伯克利加州大学绿色设计与制造联盟CGDM(Consortium on Green Design and Manufacturing),英国可持续设计中心CfSD(The Center for Sustainable Design)、德国柏林工业大学IWF(Institute for Machine Tools and Factory Management)、日本AMRI(Advanced Manufacturing Research Institute)等。近年来随着ISO14000环境管理体系系列标准、OHSAS18000职业健康与安全卫生标准系列、绿色产品标志认证等的颁布,企业环境管理和绿色制造的研究更加活跃。截至2004年底,已有127个国家90569家企业已经获得ISO14001环境管理体系认证。环境保护和绿色制造研究的形成正在全球企业界兴起。

再制造产业已在美国、欧盟等工业发达国家形成。美国于90年代初建立了国家再制造与资源恢复国家中心以及再制造研究所、再制造工业协会。目标是为工业界提供有效或经济的再制造产品或对环境没有负面影响的产品设计先进技术或工具。近年来,研究内容主要集中在:(1)全寿命周期内,产品部件老化或物理、机械性能变化分析;(2)通过有限元分析、失效分析、几何尺寸恢复、结构和材料分析判断和评估产品老化机制;(3)研究和开发经济性好、环境可靠的再制造先进技术,表面清洗技术、废物最小化技术;(4)研究用于定量测量评估部件、配件健康程度的工具和装备,用于预测产品的剩余寿命;(5)再制造可持续设计研究。工业发达国家通过这些基础研究工作积累,为再制造产业的可持续发展奠定了坚实的基础。

汽车再制造业是美国最大的再制造产业,除了对发动机进行再制造外,美国的汽车再制造公司还对其它汽车零部件进行再制造,如传动装置、离合器、转向器、启动机、化油器、闸瓦、水泵、空调压缩机、刮水器马达、油泵、刹车动作筒、动力控制泵和缓冲器等。此外,也有汽车再制造公司从事汽车轮胎再制造、泵体再制造、空调器再制造及缓冲器再制造等。据美国钢铁协会的分析报告,美国对钢铁材料报废产品的再制造已取得显著效果:节省能源47%-74%,减少大气污染86%,减少水污染76%,减少固体废料97%,节省用水量40%。美国制定的再制造中长期发展规划是:到2005年,雇佣员工100万,年销售额1000亿美元,75%的再制造公司通过ISO认证;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,并确保产品的质量和服

### 3.2 国内技术现状

自20世纪90年代中期以来,我国政府、研究机构、企业等对绿色制造和再制造给与了一定的重视和支持。国家863计划、国家973计划、国家自然科学基金等资助开展了有关绿色制造方面的一些研究课题<sup>[3,4]</sup>。但由于绿色制造本身属新兴的先进制造技术领域,在我国目前来说尚处在起步阶段,目前绿色制造研究仍处于比较分散的状况,基础较差,绿色制造技术体系还未形成,实用化关键技术和装备比较缺乏,大多数企业的认识还未到位,已有绿

色制造技术在企业推广应用也有一定难度。与回收、再制造技术相关的环境立法尚不完善,群众的思想观念比较落后。

1996年以来,国内部分高校对绿色制造领域的相关理论和技术进行了跟踪创新研究,如装甲兵工程学院对再制造基础理论和技术进行了系统研究;重庆大学在绿色制造理论体系、评价与决策技术以及车间层绿色生产技术等方面开展了研究工作;清华大学、上海交通大学以及机械科学研究院等在机电产品绿色设计、汽车回收再制造技术以及电子电气产品绿色制造技术等方面进行了研究工作并取得了一定进展;合肥工业大学在绿色设计理论与方法等开展了研究。香港生产力促进会联合电子、电气、玩具、钟表等行业协会、香港工业总会以及香港理工大学、香港城市大学成立了绿色制造联盟(Green manufacturing Alliance),开展绿色制造技术研究和政策咨询,协助企业熟悉欧洲RoHS及WEEE指令要求,突破绿色贸易技术壁垒。

国内的一些企业也开始注重绿色制造技术方面的研究,如济南复强动力有限公司与装甲兵工程学院积极合作开展在汽车发动机再制造技术的研究和应用;重庆机床厂与重庆大学在绿色滚齿机床设计和面向绿色制造工艺规划方法方面积极合作,开发了面向绿色制造的系列滚齿机以及面向绿色制造的工艺规划系统;至卓飞高线路板(深圳)有限公司与清华大学合作开展了印刷线路板回收方面的技术合作,并成立了清华至卓绿色制造研究中心;上海华东拆车有限公司与上海交通大学合作开展汽车回收技术的研究,参与了多项国家与地方项目的研究与产业化示范,并在上海建立了“废旧汽车回收拆解示范工程”;美菱公司与合肥工业大学在家电产品绿色设计方法及废旧塑料的回收再利用方面进行了卓有成效的合作;等等。

综合来看,我国产品绿色制造与再制造研究及应用工作存在全寿命周期理论研究的基础薄弱,缺少系统性理论和方法支持;寿命周期评价方法体系尚不能支持产品的设计;各种绿色设计方法和工具缺乏集成性,难以满足实际的需要;作为设计的主体,企业在绿色设计方法和工具应用方面参与较少;废旧机电产品循环利用决策研究不足;缺乏提高资源利用率,减少资源浪费和减少环境污染排放的共性技术;仅有几家正规的回收再制造企业等。

## 4 未来发展重点与建议

### 4.1 在基础研究方面

集中多学科力量, 引入信息技术、微纳米技术、生物技术, 新能源技术, 加强该前沿领域的基础科学研究和攻关; 加强对基础数据的积累和基础理论方法研究的支持; 加强与美国及欧洲等发达国家的国际合作交流, 支持此领域的国际合作项目。提高我国在此领域的知名度和水平。具体研究内容主要涉及<sup>[5]</sup>:

机电产品全寿命周期评价指标体系与方法研究, 包括: 机电产品可持续性分析建模; 全寿命周期分析和 3E (经济、环境、资源) 评估; 机电产品的可持续性评价指标体系和标准; 评价指标的量化分析方法; 面向产品寿命周期的数据库体系建立; 面向设计的产品寿命周期分析支持系统及其使能工具。

废旧机电产品循环利用决策理论及方法研究, 包括: 废旧机电产品剩余功能、剩余寿命评估理论和方法; 产品寿命周期信息跟踪技术; 废旧机电产品循环利用方式及其判据研究; 废旧机电产品循环利用决策理论与方法研究。

机电产品再循环和使能技术研究, 包括: 回收体系建立的支持理论与方法; 废弃产品的检测与评判理论与方法; 产品目标拆卸以及拆卸序列自动生成技术; 材料智能识别与分离工艺技术; 产品回收柔性单元 (FRC) 技术。

废旧机电产品再制造理论和技术研究, 包括: 基于 LCC、LCA 的再制造产品全寿命周期分析; 废旧产品失效、报废状态辨识与评估; 再制造部件的剩余寿命分析和理论; 再制造零部件的质量控制与自动监测技术; 再制造中的信息化技术; 再制造中的微纳米技术; 再制造中的智能技术; 再制造毛坯快速、智能、精确成形技术; 特殊材料快速制备与成形一体化技术; 环保高效的清洗及强化技术等。

### 4.2 在技术支撑及推动成果转化方面

重点围绕机电产品, 开展绿色制造的共性技术、绿色设计技术、绿色生产工艺技术、绿色回收处理与再制造技术等研究, 突破一批关键技术, 开

发一批具有自主知识产权的典型绿色工艺和重点装备, 实施具有示范作用的绿色制造应用工程, 形成我国绿色制造的技术体系和自主创新能力, 从而为机电行业降低资源消耗、减少环境污染、跨越绿色贸易壁垒和培育新兴产业提供关键技术支撑。

### 4.3 在推动我国绿色制造和再制造产业形成和发展方面

主要包括: 根据我国的国情需要, 应逐步建立起具有中国特色的废旧机电产品资源化的法律体系; 确定“制造商责任制”及明确政府部门、销售商、消费者各方的责任; 确立资源化企业认证制度和绿色机电产品认证体系, 建议政府制定有关机电产品生产、准入、许可审批的各项政策; 建立和完善废旧机电产品资源化的逆向物流体系; 加强专业技术人才培养

最后还应宣传普及可持续制造观念和知识, 提高全民环保意识和资源意识, 推动建立可持续制造体系。

## 参考文献:

- [1] 刘飞, 曹华军, 张华. 绿色制造的理论与技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [2] 徐滨士. 再制造工程基础及其应用 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2005.
- [3] Melngk S A, Smith R T. Green Manufacturing[M]. Dearborn, USA: Society of Manufacturing Engineers, 1996.
- [4] Gutowski, C. Murphy. Environmentally Benign manufacturing [M]. World Technology (WTEC) Division, International Technology Research Institute (ITRI), 2001.
- [5] 国家自然科学基金委员会工程与材料科学部. 学科发展战略研究报告 (2006 年~2010 年) 机械与制造科学 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [6] 埃里克 伊兹拉莱维奇. 当中国改变世界 [M]. 北京: 中信出版社, 2005.

作者地址: 北京市丰台区杜家坎 21 号 100072  
装备再制造技术国防科技重点实验室  
Tel: (010)66718475