

绿色再制造工程及其关键技术

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:再制造由维修工程和表面工程发展而来,是废旧产品高技术修复、改造的产业化。再制造关注的是产品的废旧阶段,并赋予废旧产品新的寿命,具有显著的节能减排效果,对推动循环经济发展具有重大作用。通过开发多种先进的表面工程技术,为再制造提供了更丰富的技术支撑。国内外再制造产业不断创新。我国再制造发展迅速,与国际社会交流合作广泛,目前已成为世界再制造中心之一。

关键词:工程机械;再制造;表面工程;先进技术

中图分类号:X76 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-0912(2009)11-0005-04

1 再制造的产生与特色

20世纪90年代,美国从产业角度建立了3R体系(再利用 Reuse、再循环 Recycle、再制造 Remanufacture);日本从环境保护的角度也建立了3R体系(减量化 Reduce、再利用 Reuse、再循环 Recycle)。我国在总结世界各国经验的基础上,创造性地提出具有本国特色的4R体系(减量化 Reduce、再利用 Reuse、再循环 Recycle、再制造 Remanufacture)。

再制造是指以装备全寿命周期理论为指导,以实现废旧装备性能提升为目标,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^[1]。简言之,再制造是废旧装备高技术修复、改造的产业化。再制造的重要特征是:再制造后的产品质量和性能不低于新品,有些还超过新品,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,有力促进了资源节约型、环境友好型社会的建设。可简单概括为:“两型社会”、“五六七”。

国外再制造主要采用换件修理法或尺寸修理法。换件修理法是将损伤零件整体更换为新品零件;尺寸修理法是将失配的零件表面尺寸加工修复到可以配合的范围,如缸套的活塞环磨损失效后,通过镗缸的方法恢复缸套的尺寸精度,再配以大尺寸的活塞环以完成再制造。我国的再制造是在维修工程、表面工程基础上发展起来的,主要基于表面工程、纳米表面工程和自动

化表面工程技术,不仅准确恢复废旧产品的尺寸精度,而且显著提升其性能,最重要的是资源利用率高,能源消耗少,节能减排效果非常明显。特别是,具有鲜明中国特色的自主创新技术,已达到国际先进水平。

2 再制造对节能减排的贡献

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)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)的研究。再制造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。再制造是对产品全寿命周期的延伸,再次赋予了废旧产品新的寿命周期,大大延长了产品的使用时间。再制造既具有节能节材的“节约型”特色,又具有保护环境的“友好型”特色。

2.1 再制造的“节约型”特色

2.1.1 节约材料与加工能耗

据我国第一家再制造领域的循环经济示范试点企业济南复强再制造公司的数据统计,若每年再制造5万台斯泰尔发动机,可节省3.825万t金属,回收附加值16.15亿元,可节电7250万kW·h,实现利税1.45亿元,减少CO₂排放3000t^[2]。

2.1.2 节省机械运行维护费用

基金项目:国家自然科学基金重点项目(50735006)、国家973项目(2007CB607601)、国家863项目(2007AA04z408);
国家科技支撑项目(2008BAK42b03)

作者简介:徐滨士(1931-),男,教授,中国工程院院士。



经对再制造的纳米减摩自修复添加剂运用效果的统计,若在1 000台斯太尔重型卡车上推广该技术,1年(行驶5万km)可节约柴油800 t左右,约合400万元;节约润滑油50 t,约合60万元;节约机件磨损、维修成本等200万,共节省费用660万元。

2.2 再制造的“友好型”特色

2.2.1 减少对环境的污染

废旧零部件因被直接用作再制造的“毛坯”,而避免了材料回炉对环境造成的二次污染;再制造零部件因具有近净成形的特征,而减少了后续制造加工过程(铸、锻、焊、车、铣、磨)的能源、设备消耗,以及加工过程对环境的污染。

2.2.2 减少固体垃圾,提高装备的绿色环保水平

通过再制造可把尾气排放为“欧0”级的斯太尔发动机提升至“欧II”级标准,报废装备因可以再制造,避免了成为固体垃圾而造成环境污染^[3]。

3 用于再制造的表面工程技术

再制造的优异效果需要有关键技术予以支持。表面工程技术是再制造的关键支撑技术。在传统表面工程技术基础上,开发了性能更优异的纳米表面工程技术和自动化表面工程技术。前者充分利用了纳米颗粒的小尺寸效应,大大提高了再制造产品的表面性能;后者适应了再制造生产对批量化、自动化的迫切需求,在提高生产率的同时,进一步提高了再制造产品的质量。上述技术均已应用于国家首批示范试点企业济南复强再制造公司的汽车发动机再制造生产线。

3.1 纳米表面工程技术^[4]

微纳米技术是21世纪出现的3大高新技术之一。整体纳米化技术的应用估计还需20~30年时间。在现阶段,将纳米颗粒弥散分布在表面涂层内,使纳米材料与传统表面工程技术相融合,发挥纳米材料的优异效果,开发了具有自主知识产权的纳米表面工程技术。

3.1.1 纳米颗粒复合电刷镀技术^[5-6]

通过在普通电刷镀液中添加纳米陶瓷颗粒,并解决纳米颗粒在盐溶液中的团聚倾向和非导电的纳米陶瓷颗粒与金属实现共沉积等两大技术难题,实现了纳米颗粒与基体金属之间牢固的化学键结合,从而依靠纳米颗粒的特殊性能,大幅度提高了电刷镀层的力学、摩擦学等性能。针对汽车发动机的关键零部件,如曲轴、凸轮轴、连杆,利用纳米颗粒复合电刷镀技术制备的纳米颗粒复合电刷镀层提高了零件的耐高温、耐磨损和抗疲劳性能。尤其突出的是,该技术成功完成

了进口飞机发动机压气机叶片的再制造,使叶片抗微动磨损性能显著提高,300 h台架试验验证满足要求,再制造费用仅是从国外进口技术实施维修费用的1/10,突破了维修技术瓶颈,获得了显著的效果。

3.1.2 纳米热喷涂技术^[7]

以现有热喷涂技术为基础,通过喷涂纳米结构颗粒粉末或含纳米结构颗粒的丝材,得到具有纳米结构涂层的新技术称为纳米热喷涂技术。利用自行开发的高效能超音速等离子喷涂设备(HEPJ)制备了各种高熔点的纳米结构陶瓷或金属陶瓷涂层,涂层以纳米晶为主,同时辅以亚微米晶。纳米热喷涂涂层的结合强度、致密性和其他综合性能显著提高。对于同一种美国产 Al_2O_3/TiO_2 纳米复合粉末,分别利用HEPJ和美国产的某型等离子喷涂设备制备纳米结构涂层。结果表明,国产喷涂设备制备的纳米结构涂层的硬度和结合强度分别是美国喷涂设备制备涂层的1.5倍和2.5倍。该技术目前已用于军用车辆发动机再制造生产线。

3.1.3 纳米减摩自修复添加剂技术^[8]

纳米减摩自修复添加剂技术是一种通过摩擦化学作用,在摩擦副表面形成具有减摩润滑和自修复功能的固态修复膜,达到磨损和修复的动态平衡,从而在不停机、不解体状况下实现磨损表面减摩和自修复的技术。拥有自主知识产权的纳米减摩自修复添加剂M6在6缸吉普车发动机中进行了300 h耐久性台架试验,结果使发动机功率提高了6%,转矩提高了2%,油耗下降了6%;在青岛交运巴士公司的3辆公交车上进行了15 000 km的应用试验,提高发动机输出功率2%~5%,节约燃油3%~6%,降低尾气排放30%~50%;在20辆重载车辆发动机上进行了一年半的实车考核,改善了活塞与气缸的密闭性,原先存在烧机油现象的发动机明显好转,机油寿命延长50%,换油周期延长1倍。

3.2 自动化表面工程技术^[9]

再制造过程是产业化、批量化的生产加工过程。为了更好地适应再制造的产业化要求,表面工程技术必须从手工操作发展到自动化操作。重点开发的自动化高速电弧喷涂技术、自动化纳米颗粒复合电刷镀技术和半自动化微弧等离子熔覆技术,进一步提高了表面涂层的性能和再制造质量。

3.2.1 自动化高速电弧喷涂技术^[10]

利用操作机夹持喷枪,通过编程实现喷涂过程的路径规划,实时反馈调节喷涂工艺参数,按照设定路径实现自动化的喷涂作业。该技术用于重载汽车发动机



缸体、曲轴箱体等重要零件的再制造,单件发动机箱体的再制造时间由手工操作的 1.5 h 缩短为 20 min,效率提高 4.5 倍。曲轴、缸体等零件的再制造,其材料消耗为零件本体质量的 0.5%,费用投入不超过新品价格的 10%。再制造曲轴还减少了新曲轴制造中的 400 °C 条件下 8 h 的碳氮共渗工序,节约了大量能源。

3.2.2 自动化纳米颗粒复合电刷镀技术^[11]

通过解决刷镀过程中镀液连续供给和循环利用和镀覆过程的实时监控等关键难题,实现了纳米颗粒复合电刷镀工艺的自动化,研制出用于斯太尔汽车发动机连杆再制造的自动化纳米颗粒复合电刷镀专机,可一次性完成 4~6 件发动机连杆的电刷镀,并使单件作业时间由 60 min 缩短为 5 min,效率提高 10 倍以上。再制造连杆所需的能源消耗和材料消耗分别为新品连杆的 50% 和 10%,成本仅为新品连杆的 10%。自动化纳米电刷镀再制造连杆的耐磨性是同类手工电刷镀连杆的 2 倍左右。

3.2.3 半自动化微束等离子弧熔覆技术^[12]

微束等离子弧具有高电流密度、小热量输入的特点,解决了中小零部件弧焊修复时因热量输入大而引起变形的问题,而且熔覆层与基材为冶金结合,可以抵抗冲击、交变载荷。按以前的发动机修理规范,气门密封锥面磨损超差后,只能做报废处理。该技术实现了废旧气门的再制造,再制造后气门变形量小,表面硬度恢复到磨损前的数值,质量超过了新品。每只新品排气门价值 70 元,而再制造一个废旧排气门的成本约为 10 元。

4 国内外再制造的新发展

4.1 国外再制造的发展

再制造在欧美等发达国家已有几十年的发展历史,在废品回收责任制、再制造产品质量保证、再制造产品销售和售后服务等方面都已形成了较完善的制度。

4.1.1 废品回收责任制

欧盟要求厂家为其产品对环境造成的影响负责,相关垃圾的回收和处理费用由厂家承担。日本政府制定政策,要求制造商、零售商和消费者分担产品回收费用,即消费者出回收费、零售商负责收集、制造商要对废旧产品进行回收利用。北美工程机械市场提高了国际交易的门槛,要求制造商在出售产品的同时,也必须承担回收责任,应拿出销售额的 50% 回收废旧产品。

4.1.2 再制造产品的质量

欧美国家对再制造产品的质量保证有严格要求,再制造产品必须在质量、性能、售后服务上达到与新品一样的水平。对再制造产品实施与新品一样的管理,包括质量标准、企业准入门槛、税收政策等。针对再制造行业的特殊性,政府部门还制定了与再制造产品相关的广告、标识及知识产权等方面的规定。

4.1.3 再制造的经济效益

制造商开展再制造,已成为新的经济增长点。美国卡特彼勒公司开展工程机械再制造,不仅没有影响新品销售,反而因能够为用户提供更廉价的再制造零部件而大大增强了其竞争力,销售收入增长更快。1996 年,美国专业化再制造公司达 73 000 家,年销售额 530 亿美元,直接雇员 48 万人^[13]。2005 年,美国再制造产业产值已超过 800 亿美元,其中汽车和工程机械再制造占 2/3 以上,约 500 亿美元。

4.2 我国再制造的发展

我国再制造产业发展相对较晚,但发展势头很好,目前已成为世界上最重要的再制造中心之一。

2005 年 7 月,国务院颁布的 21 22 号文件明确表示国家将“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”。2008 年 11 月,国家发改委等 6 部委联合公布了国家首批循环经济示范试点领域及企业名单,再制造成为 4 个重点领域之一,济南复强再制造公司被列为再制造重点领域中的试点单位。

2006 年,时任国务院副总理曾培炎就发展我国汽车零部件再制造产业做出重要批示:“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”。

2007 年,根据曾培炎副总理的指示,国家发改委组织开展了国内汽车零部件再制造产业试点的系列工作,并委托中国汽车工业协会牵头,成立了由原机械工业部部长何光远和徐滨士院士为顾问的专题研究小组。

2008 年 3 月,国家发改委批准全国 14 家企业作为新一轮“汽车零部件再制造产业试点企业”,其中包括一汽、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。2008 年 6 月,国家标准化管理委员会批准成立“全国绿色制造标准化技术委员会再制造分技术委员会”,由装备再制造技术国防科技重点实验室作为秘书处挂靠单位和委员会筹建单位,目前该实验室正在积极开展再制造术语标准、再制造

技术工艺标准、性能检测标准、质量控制标准,以及关键技术标准的制订等相关工作。

2009年1月,《中华人民共和国循环经济促进法》正式生效,标志着再制造已进入国家法律。《循环经济促进法》第四十条指出:“国家支持企业开展机动车零部件、工程机械、机床等产品的再制造和轮胎翻新”,并规定“销售的再制造产品和翻新产品的质量必须符合国家规定的标准,并在显著位置标识为再制造产品或者翻新产品”。2009年4月,国家发改委组织发布了全国统一的汽车零部件再制造产品标志。

2009年4月,国务院召开全国循环经济座谈会,中共中央政治局常委、国务院副总理李克强,全国政协副主席、科技部部长万钢,中国工程院院长徐匡迪等领导出席,特邀9名循环经济领域的院士和企业家出席会议。“中国特色的再制造产业发展现状与对策建议”的发言,受到李克强副总理的关心重视。

4.3 再制造的国内外合作

4.3.1 科研合作

装甲兵工程学院装备再制造技术国防科技重点实验室(以下简称实验室),2005年与波兰华沙理工大学联合承担了中波政府合作项目《先进材料再制造成形技术》,2007年,与英国伯明翰大学联合承担了中英自然科学基金合作项目《复合再制造技术提高重载齿类件接触疲劳寿命及其机理研究》,2008年,与英国伯明翰大学共同承担国家自然科学基金重点项目《机电产品可持续性设计与复合再制造的基础研究》。

4.3.2 交流平台合作

实验室2003年与美国史蒂文理工大学建立起再制造信息交流平台,双方共享中美两国的再制造政策与技术信息。2006年,与英国伯明翰大学以及英国最大的再制造公司李斯特派特公司达成协议,三方共同建立“国际再制造技术生产实验室”,由实验室提供主要技术。国际再制造技术生产实验室的建立为再制造产、学、研的国际化交流搭建了平台。

4.3.3 技术合作

2004年,英国李斯特派特公司引进实验室的纳米自修复添加剂M6,在英国本土进行了600h发动机台架试验。结果表明,M6具有优异的耐冲击性能和承载性能,可使发动机燃油消耗降低3.6%,降低摩擦副零部件的磨损达50%。2006年,英国路虎(Land-Rover)公司委托实验室对其路虎汽车发动机铝合金缸盖进行再制造。铝合金再制造是一项国际性的难题,实验室利用先进的高速电弧喷涂技术及激光表面熔覆技

术,开发了专用成形材料,成功完成了铝合金缸盖的再制造。英方的台架试验及实车考核结果表明,再制造的路虎发动机铝合金缸盖的综合质量达到了新品水平。

4.3.4 学术合作

2005年,由中、美、德三国自然科学基金委员会共同主办的“第三届可持续制造国际研讨会”(International Workshop on Sustainable Manufacturing)在中国上海召开,中国成为第一个承办可持续制造与再制造领域国际高层会议的发展中国家,再制造是大会的主要议题。2008年,由中国设备管理协会、欧洲国家维修联盟、巴西维修协会共同主办的“第四届世界维修大会”(The 4th World Congress on Maintenance)在中国海南召开,来自世界30多个国家的350余位代表参会。这是首次在中国举办的世界级维修大会,再制造成为本次大会的重要专题。

5 结论

(1)再制造是废旧产品高技术修复、改造的产业化,是实现节能减排的重要手段。

(2)再制造优异的节能减排效果是依赖先进的表面工程技术实现的。在传统表面工程技术基础上,自主研发的纳米表面工程技术和自动化表面工程技术,为再制造提供了更丰富的技术手段。

(3)再制造已融入国家的社会经济发展之中,是构建循环经济的支撑要素,中国已成为国际再制造中心之一,在国际再制造领域发挥着重要作用。

参考文献

- [1] 徐滨士.绿色再制造工程及其在我国的应用前景[R].工程科技与发展战略咨询报告集,中国工程院.2002.
- [2] Xu B S, Wang H D, Liang X B, et al. The good maintenance technologies based on nano surface engineering [C]. Proceedings of International Conference on Intelligent Maintenance Systems. 2003: 457- 466.
- [3] 徐滨士.发展再制造工程,实现节能减排[J].装甲兵工程学院学报.2007.21(5):1- 5.
- [4] 徐滨士.纳米表面工程[M].北京:化学工业出版社,2004.
- [5] Xu B S, Wang H D, Dong S Y, et al. Electrodepositing nickel silica nano- composites coatings [J]. Electrochemistry Communications. 2005.7(6): 572- 575.
- [6] Xu B S, Wang H D, Dong S Y, et al. Fretting wear- resistance of Ni- base electro- brush plating coating reinforced by nano alumina grains[J]. Materials Letters. 2006, 60(5): 710- 713.
- [7] Zhu S, Xu B S, Yao J K. High quality ceramic coatings sprayed by high efficiency hypersonic plasma spraying (下转第25页)



绿色发展、低代价发展的迫切要求和战略选择。我国发展低碳经济,必须正确认识与处理好4个方面的重要关系:低碳经济与可持续发展经济的关系;低碳经济与绿色经济的关系;低碳经济与循环经济的关系;发展低碳经济与建设生态文明和“两型社会”的关系。

参考文献

- [1] 中国生态经济学会.“2009 年全国生态经济建设理论与实践学术研讨会”会议论文集[CD] 2009.

Review of "2009 National Symposium on the Theory and Practice of Ecological Economic Development"

MA Cuiling, LIU Huixia

(Gansu Institute of Administration, Lanzhou 730000, China)

Abstract: "2009 National Symposium on the Theory and Practice of Ecological Economic Development", was held on July 22, 2009 in Gansu Institute of Administration. Concerns the core topic "Developing circular economy and building an ecological civilization", the discussion and communication included the path of developing circular economy in central and western regions, the Green New Deal and Green Economy, the contacts and differences between Marxism ecological economics and ecological Marxism economics, the major research team in circular economy in our country and low-carbon economy.

Keywords: circular economy; ecological civilization; Marxism ecological economics; Green Economy; low-carbon economy

(收稿日期 2009-09-25)

(上接第8页)

- gun[J]. Materials Science Forum. 2005. 475- 479. 3981- 3984.
- [8] 徐滨士, 张伟, 刘世参, 等. 现代装备智能自修复技术[J]. 中国表面工程, 2004, 17(1): 1- 4.
- [9] Xu B S. Remanufacturing engineering and automatic surface engineering technology [J]. Key Engineering Materials. 2008. 373- 374. 1- 11.
- [10] Bai J Y, Chen Y X, Cheng J B, et al. An automatic high velocity arc spraying system [J]. Key Engineering Materials. 2008. 373- 374. 89- 92.
- [11] Wu B, Xu B S, Zhang B, et al. Preparation and properties

of Ni/nano- Al_2O_3 composite coatings by automatic brush plating [J]. Surface & Coatings Technology, 2007, 201 (16- 17): 6933- 6939.

- [12] Lv Y H, Xu B S, Xiang Y H, et al. Plasma transferred arc powder surfacing technology of thrust face [J]. Key Engineering Materials, 2008, 373- 374. 43- 46.
- [13] Robert T Lund. The remanufacturing industry hidden giant [R]. Research Report. Boston University: Manufacturing Engineering Department. 1996.

Remanufacture and the technological support

XU Binshi

(National Key Lab for Remanufacturing, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072, China)

Abstract: Remanufacture rises from maintenance and surface engineering, and aims at the high-tech recovering and reconstructing of waste products. Remanufacture gives rebirth to products during the date of retirement so that it could obviously save energy and reduce pollution, which is meaningful to the circular economy development. The innovations in surface engineering technology greatly support the remanufacture. There are a lot of achievements in remanufacture both home and broad. A fast growth and extensive international cooperation in remanufacture make our country one of the world remanufacture centers.

Keywords: engineering machine; remanufacture; surface engineering; advanced technology

(收稿日期 2009-09-14)

