

再制造技术体系及典型技术

孙晓峰, 史佩京, 邱 骥, 马世宁

(装甲兵工程学院 装备维修与再制造工程系, 北京 100072)

摘 要: 再制造技术是实现废旧产品性能提升的有效途径, 建立完善和系统的再制造技术体系则是提升再制造产业技术水平的必由之路。随着再制造产业的不断发展, 逐步形成了以再制造快速成形与加工技术、再制造拆解与清洗技术和再制造无损检测与寿命评估技术为主的技术体系。结合再制造技术及工程实际应用, 文中介绍了 12 种典型的再制造技术及其在装备维修与再制造中的应用。

关键词: 再制造; 技术体系; 应用

中图分类号: TH16

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2013)05-0117-08

Technical System and Typical Technologies of Remanufacture

SUN Xiao-feng, SHI Pei-jing, QIU Ji, MA Shi-ning

(Department of Maintenance and Remanufacturing Engineering, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072)

Abstract: Remanufacturing technology is an effective way to achieve the performance improvement of the used product, and establishing the improving and systematic remanufacturing technical system is the significant way to promote the technology level of remanufacturing industry. Along with the development of the remanufacturing industry, the technical system composed mainly of remanufacturing rapid shaping and processing technique, remanufacturing disassembled and cleaning technique, and remanufacturing nondestructive testing and life assessment technique has formed gradually. Combined with the remanufacturing technology and practical engineering application, twelve typical remanufacturing technologies and their applications in the equipment maintenance and remanufacturing engineering are introduced.

Key words: remanufacturing; technical system; application

0 引 言

再制造工程是指以产品全寿命周期理论为指导, 以实现废旧产品性能提升为目标, 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、改造废旧产品的一系列技术措施或工程活动的总称。简言之, 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^[1]。在国家可持续发展战略和“以人为本, 全面、协调、

可持续的人口、资源、环境协调发展”的科学发展观指导下, 再制造工程已成为构建循环经济的重要组成部分。

废旧产品的再制造工程是通过各种高新技术来实现的, 再制造产品质量的好坏是由关键技术来决定的。我国的再制造是在维修工程、表面工程基础上发展起来的^[2], 且随着再制造工程的不断发展, 逐步形成了以寿命评估技术、复合表面工程技术、纳米表面技术和自动化表面技术为核心的再制造关键技术群。再制造关键技术包含的技术种类繁多, 涉及多门学科的交叉融合, 在实际应

收稿日期: 2013-09-20; 修回日期: 2013-10-08

作者简介: 孙晓峰(1977—), 男(汉), 辽宁丹东人, 助理研究员, 博士; 研究方向: 装备维修与战场抢修

网络出版日期: 2013-10-09 14:24; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20131009.1424.001.html>

引文格式: 孙晓峰, 史佩京, 邱骥, 等. 再制造技术体系及典型技术[J]. 中国表面工程, 2013, 26(5): 117-124.

用中应将其与再制造流程有机结合,对关键技术进行归纳和分类,逐步形成较为系统和完善的体系,为再制造工程发展提供技术支撑。

1 再制造技术体系

为引导再制造技术装备研发,推动先进再制造技术及装备的示范应用和推广,加快提升再制造产业技术水平,2012 年 4 月工业和信息化部与科学技术部共同下发了《机电产品再制造技术及装备目录》(以下简称《目录》)。该《目录》中所列出的机电产品再制造技术体系包括再制造成形与

加工技术、再制造拆解与清洗技术和再制造无损检测与寿命评估技术三大技术群,共 26 项关键技术。表 1 给出的是《目录》中所列出的机电产品再制造技术体系内容。再制造快速成形与加工技术是基于离散——堆积成形原理,利用快速反求、高速电弧喷涂、微弧等离子、堆焊和激光快速成形等技术,针对损毁零件的材料及性能要求,采用实现材料单元的定点堆积,自下而上组成全新零件或对零件缺损部位进行堆积修复,快速恢复缺损零部件的表面尺寸及性能的一种再制造生产方法^[3]。再制造拆解与清洗是实现高效回收策略的

表 1 机电产品再制造技术体系
Table 1 Remanufacturing technology system of electromechanic products

再制造 技术 体系	再制造成形与加工技术	激光熔覆成形技术 等离子熔覆成形技术 堆焊熔覆成形技术 高速电弧喷涂技术 高效能超音速等离子喷涂技术 超音速火焰喷涂技术 纳米复合电刷镀技术 铁基合金镀铁再制造技术 金属表面强化减摩自修复技术 类激光高能脉冲精密冷补技术 金属零部件表面粘涂修复技术 再制造零部件表面喷丸强化技术
	再制造拆解与清洗技术	拆解信息管理系统 机械结构件销轴与轴套无损拆解技术 液压油缸活塞杆无损拆解技术 泵车支腿、转塔无损拆解技术 电机轴承拆解技术 高效喷砂绿色清洗与表面预处理技术 废旧机械零部件高温高压清洗技术 废旧机械零部件超声清洗技术 废旧机械零部件表面油漆清除技术
	再制造无损检测与 寿命评估技术	再制造毛坯缺陷综合无损检测技术 再制造零件表面涂层结合强度评价技术 再制造零件服役寿命模拟仿真综合验证技术 再制造零件动态健康监测技术 发动机曲轴疲劳剩余寿命评估技术

重要手段,同时也是再制造过程中的重要工序。通过先进的拆解和清洗技术,高质量的获取废旧产品零部件,同时也为零部件全面鉴定和保证再制造产品质量奠定基础。再制造无损检测与寿命评估是对零件几何参数和软科学性能的鉴定,是对零件缺陷和剩余寿命的无损检测和评估,它直接影响再制造质量、成本、时间以及再制造后产品的使用寿命^[3]。

2 典型再制造技术研究与应用

2.1 寿命评估预测技术

寿命评估预测技术是再制造工程核心研究内容之一,是确保再制造产品质量、性能不低于新品的关键技术。再制造毛坯经历了一轮服役周期的使用过程,服役时可能产生不同程度的损伤。再制造前,必须采用先进的无损检测技术评价毛坯的剩余寿命,这是实现再制造产品质量控制的重要手段。寿命评估技术已在济南复强动力有限公司再制造生产线上应用。采用金属磁记忆检测、涡流检测、超声检测等综合检测技术,初步实现了发动机气门杆、连杆、曲轴、发动机缸体等重要零部件损伤和寿命的检测评估(见图1、图2)。



图1 涡流/磁记忆综合检测评估发动机缸体

Fig. 1 Evaluating engine cylinder by eddy current and magnetic memory testing

2.2 激光熔覆技术

激光熔覆技术是以激光作为热源,在工件表面上涂敷一层金属或合金粉末,形成与基体材料不同的涂层,并且使涂层和基体产生冶金结合的一种表面技术(见图3)。激光熔敷具有很多优点,可在低熔点工件上熔敷一层高熔点的合金,能

精确控制稀释,可局部熔敷,由于快速加热和冷却过程,激光涂层组织均匀致密,微观缺陷少,具有良好的熔合界面。

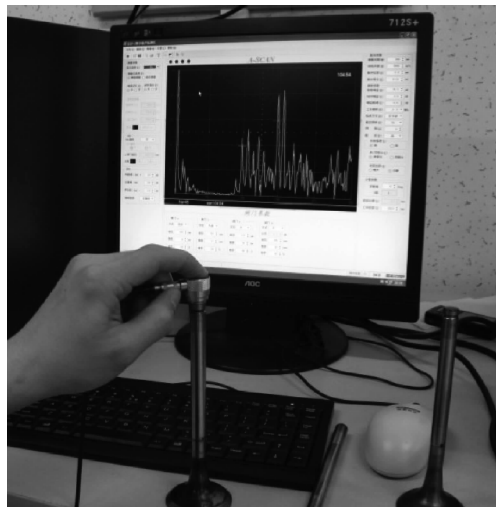


图2 超声检测评估发动机气门杆

Fig. 2 Evaluating engine valve stem by ultrasonic testing

自动化激光熔覆技术是指采用工业机器人或操作机在规定的程序控制下自动完成零件损伤部位的修复和再制造的表面技术。自动化激光熔覆技术在对损伤零件进行修复和再制造时,具有可自由选区修复、零件基体变形小、修复部位和基体为冶金结合、修复部位力学性能好、后加工余量小等诸多优点。再制造技术重点实验室利用自动化激光熔覆表面技术成功完成了齿面磨损失效严重的重载齿类零件的再制造,解决了再制造过程中熔覆层开裂、基体局部过热、熔覆齿面尺寸精度保证和性能提升等实际难题,激光熔覆再制造后齿面的耐磨性能、抗接触疲劳性能达到了新品零件服役性能的要求^[4](见图4)。

2.3 高速电弧喷涂技术

高速电弧喷涂技术是以电弧为热源,将熔化的金属丝材用高速气流雾化,喷射到工件表面形成涂层的一种工艺,与其它热喷涂技术相比,高速电弧喷涂技术具有沉积效率高、能耗低、经济性好、涂层组织致密等特点,尤其是用在再制造与快速成形领域^[5]。再制造技术重点实验室自主创新的自动化高速电弧喷涂系统,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(见图5)。高速电弧喷涂技术已成功应用于发动机再

制造生产线,再制造生产汽车发动机曲轴和缸体等重要零部件,提高了再制造生产质量和效率^[6]。

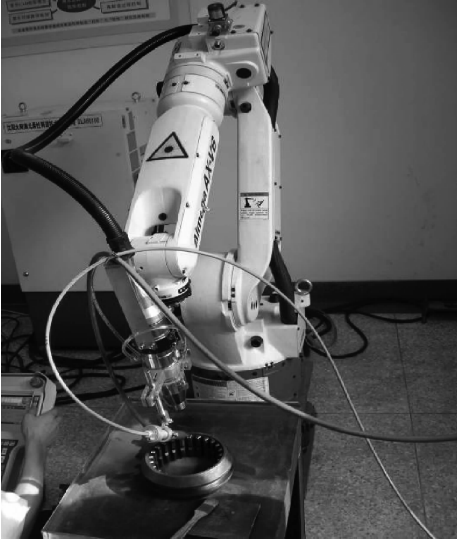


图 3 自动化激光熔覆设备
Fig. 3 Automation laser cladding equipment

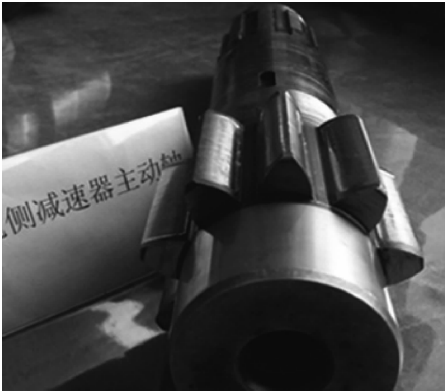


图 4 激光熔敷技术再制造重载车辆侧减速器主动齿轮
Fig. 4 Driver gear of the side speed-reducer in a heavy-loaded tracked vehicle remanufactured by laser cladding



图 5 机器人自动化喷涂发动机曲轴
Fig. 5 Deposition process on the engine crankshaft of the automatic spraying system

2.4 纳米颗粒复合电刷镀技术

纳米颗粒复合电刷镀技术是在传统电刷镀技术基础上发展起来的,通过在镀液中添加纳米陶瓷颗粒以提高涂层修复性能,其在失效零部件的修复和再制造方面有重要作用。纳米复合电刷镀成为对再制造产品恢复尺寸的重要手段,尤其是在薄壁件、细长杆、精密件的再制造过程中经常用到。纳米颗粒的加入使镀层的性能大大提高,可以解决再制造过程中的许多难题。

手工电刷镀生产效率低、劳动强度大、质量稳定性较差。针对重载汽车发动机再制造生产急需,研发出了连杆自动化纳米电刷镀再制造专机(见图 6)和发动机缸体自动化纳米电刷镀再制造专机(见图 7),并已经在国家循环经济示范试点企业——济南复强动力有限公司的发动机再制造生产中成功应用^[7]。该专机突破了国外发动机缸体、缸筒只能采用尺寸修理法和换件加衬套修复,且修复次数有限的局限,显著延长了缸体服役寿命,再制造后的性能超过了新品的。

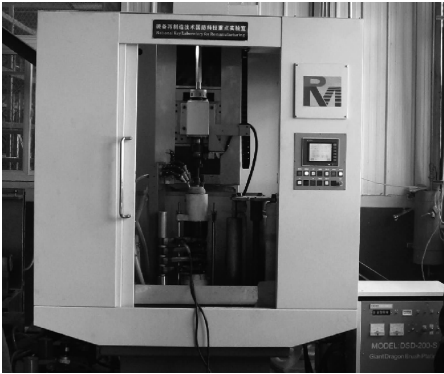


图 6 连杆自动化纳米电刷镀再制造专机
Fig. 6 Nano electro-brush plating special auto-machine for remanufacturing crank arms



图 7 发动机缸体自动化纳米电刷镀再制造专机
Fig. 7 Nano electro-brush plating special auto-machine for remanufacturing cylinders

2.5 低温离子复合处理技术

低温离子复合处理技术是指先在基体表面进行离子氮碳共渗(软氮化)耐磨、硬化处理,然后再进行硫化减摩处理,提升装备表面耐磨、减摩性能,从而延长使用寿命的表面技术^[8](见图 8)。低温离子复合层与未处理的表面相比,摩擦因数降低 40%,相对耐磨性能提高 8 倍多,抗划伤性能提高 10 倍以上。从 2004 年 7 月开始,利用该技术先后处理了多个舰船大功率柴油机缸套,在海军舰艇上实船应用,抗划伤效果显著(见图 9)。



图 8 低温离子复合处理设备
Fig.8 Low temperature ion composite processing equipment



图 9 处理后的发动机缸套
Fig.9 Engine cylinder after treatment

2.6 纳米固体润滑干膜技术

纳米固体润滑干膜技术是一种新型减摩技术,是将固态物质涂(镀)于摩擦界面,以降低摩擦,减轻磨损的技术。与常用的液体润滑相比,不需要专门的润滑装置,不存在泄漏的问题,而且能够在高温、高负荷、超低温、超高真空、强氧化还原和强辐射等环境条件下有效润滑。纳米固体润滑

技术通过在固体润滑干膜中添加润滑和抗磨作用的纳米粒子,改善固体润滑干膜的润滑、耐磨损性能,能够在常规油脂不宜使用的特殊环境下实现有效润滑,耐磨性提高了 2~3.5 倍,防腐性能提高 25%。目前已在坦克上应用,军事效益和经济效益显著(见图 10)。



图 10 纳米固体润滑技术在重载装备摩擦副上的应用
Fig.10 Application of nano solid lubrication technology in the side speed-reducer in a heavy-loaded tracked vehicle

2.7 纳米减摩自修复添加剂技术

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^[2]。纳米自修复添加剂(见图 11、图 12)在英国 Lister-Petter 公司两台柴油发动机 600 h 台架试验的应用试验表明:使用该添加剂后可使燃油消耗率降低 3.6%,发动机尾气颗粒含量降低约 30%,排放烟度降低约 50%,机油中 Fe 元素含量降低 47.8%,机油使用寿命延长 1 倍。

2.8 铝合金表面陶瓷化技术

铝合金表面陶瓷化技术是将铝合金工件放置在含纳米陶瓷颗粒的电解质溶液中,并施加高电压(直流、交流或脉冲),通过在铝合金表面的微弧氧化作用原位生成陶瓷层,同时溶液中的纳米陶瓷颗粒弥散镶嵌在原位生成陶瓷的疏松层中,获得致密的纳米复合陶瓷层(见图 13)。与普通微弧氧化陶瓷层相比,纳米复合陶瓷层的孔隙率降低约 60%,孔径尺寸下降一个数量级,显微硬度提高了 10 GPa(达 27 GPa),耐磨性提高 50%,抗盐雾腐蚀性能提高 2 倍以上,抗热冲击性能提高 2 倍以上,是装备铝合金零部件表面强化的有效手段。



图 11 纳米减摩自修复添加剂

Fig. 11 Nanoscale anti-friction self-repairing additives

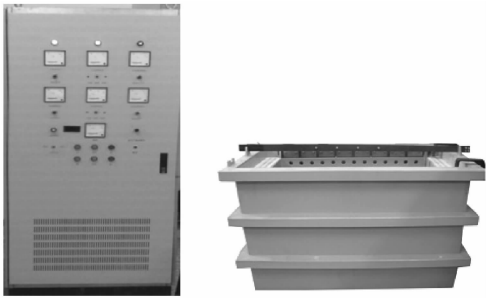


图 13 铝合金表面陶瓷化设备

Fig. 13 Aluminum alloy surface ceramic equipment

2.9 类激光高能脉冲精密冷补技术

类激光高能脉冲精密冷补技术是一种新型金属零件表面修补技术,采用断续的高能电脉冲,在电极和工件之间形成瞬时电弧,使修补材料和工件迅速熔结在一起,达到冶金结合,其修补效果类似于激光焊^[9]。该技术采用的高能脉冲能量集中、作用时间短,产生的瞬时电弧使得热影响区金属过热比较小,实现了失效表面的冷补修复,有效地避免了薄壁类零件在其它焊修时产生的形变。同时在修补过程中有氩气在电弧周围形成气体保护层,防止了空气对钨极、熔池及邻近热影响区的有害影响。利用该技术得到的修补层致密,结合强度高,修复成形好,其修复效果可与电子束焊、激光焊相媲美^[10]。该技术目前主要应用于液压支柱、发动机曲轴、变速箱齿轮等精密、中载荷零部件的修复(见图 14、图 15)。

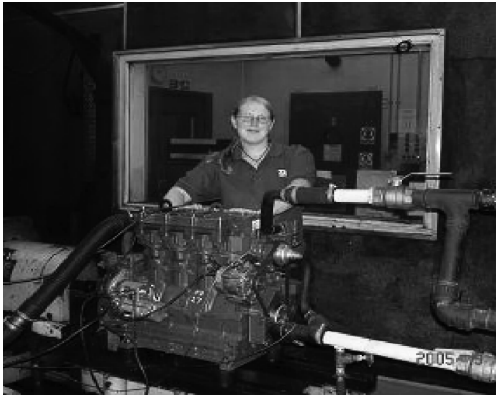


图 12 纳米减摩自修复添加剂应用在柴油发动机台架试验
Fig. 12 Application of nanoscale anti-friction self-repairing technology in the diesel engine test bench



图 14 在轻型柴油机气缸体肩胛密封面上的应用
Fig. 14 Application on the sealing surface of cylinder body in the light diesel engine



图 15 修复发动机缸体肩胛密封面损伤
Fig. 15 Repairing the damage of the sealing surface of engine cylinder block

2.10 微束等离子弧熔覆技术

微束等离子弧熔覆技术是以微束等离子弧为热源,将合金粉末加热,在零件表面熔覆形成,实

现零件再制造的新型表面技术^[4]。再制造技术重点实验室研发了新型微束等离子系统(见图 16),具有很高的电弧稳定性和较大的电流使用范围,可以满足不同厚度零部件的修复与再制造。并且已经成功的将该系统应用在了斯太尔发动机气门的再制造上,修复气门磨损面(见图 17)。发动机排气门的再制造要求气门基体变形很小,修复层与基体实现冶金结合,而且硬度接近或者优于原材料。焊接的熔合区、热影响区很小,焊缝组织致密均匀,这是由于微束等离子熔敷时电流小,而能量集中,熔敷过程对基体的影响很小,因此熔敷层的质量很高,且与基体结合紧密。



图 16 自动化微束等离子熔覆系统

Fig. 16 Automatic micro-beam plasma cladding system



图 17 熔覆再制造并机械加工后的气门

Fig. 17 Valves after cladding remanufacturing and machine

2.11 高速颗粒冲击表面纳米化技术

高速颗粒冲击表面纳米化技术是一种利用气-固双相流作为载体,用超音速气流携带硬质固体微粒,以极高的动能轰击金属表面使金属表面发生强烈的塑性变形,将晶粒细化到纳米量级的新的表面纳米化技术。其晶化晶粒的机理与其他表面机械处理法相类似,所用设备灵活度较强,工作

效率高,可用于复杂形状和大面积金属构件的表面纳米化处理(见图 18)。喷丸是一种成熟的表面机械强化技术,由于成本相对低廉,并且对于改善材料和零件的耐磨性、接触疲劳性能和低温下的疲劳性能具有明显的作用,因此在工业生产中得到了极为广泛的应用(见图 19)。



图 18 高速颗粒冲击表面纳米化设备

Fig. 18 High speed particles impact equipment for surface nanocrystallization

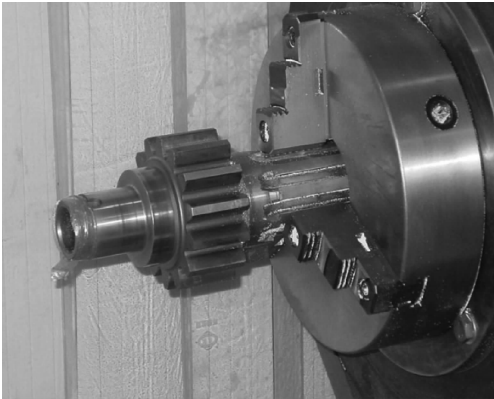


图 19 强化后的重载车辆侧减速器主动轴

Fig. 19 Driver gear of the side speed-reducer in a heavy-loaded tracked vehicle after strengthening

2.12 预压力滚压表面纳米化技术

预压力滚压表面纳米化技术主要用于对轴类零件进行表面晶粒的细化和结构优化。通过滚压头在零件表面的滚压,使零件自身表层形成了纳米晶结构,硬度提高,并形成了残余压应力,从而使零件的耐蚀性、耐磨性、配合性和抗疲劳性能得到明显改善。

预压力滚压设备类似于普通车刀,无需外界能量输入,只需卡在普通车床上即可对轴类零件进行表面结构优化。该技术具有较强的通用性,适用于各类轴类金属零部件的表面强化处理。利用该技术对坦克平衡肘进行处理,表面晶粒细化到 10 nm,摩擦因数降低 10%,耐磨性能提高 4 倍左右(见图 20、图 21)。

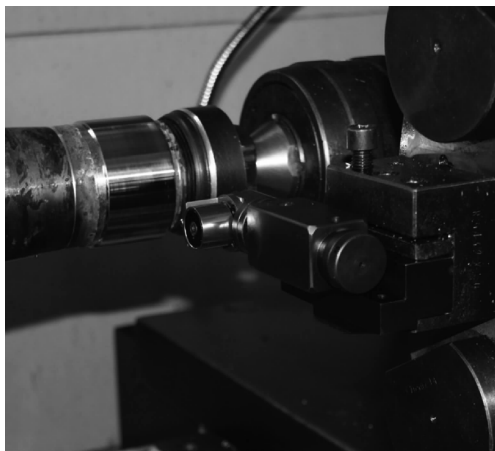


图 20 预压力滚压修复强化轴类零件

Fig. 20 Shaft part repaired and enhanced by pre-pressure rolling process

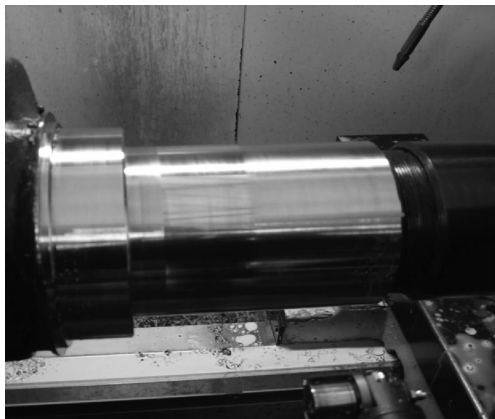


图 21 修复强化后的轴类零件

Fig. 21 Shaft part repaired after rolling process

3 结 论

再制造技术是实现废旧产品性能提升的有效途径,建立完善和系统的再制造技术体系则是提升再制造产业技术水平的必由之路。要大力加强

再制造工程关键技术研究,重点发展装备的再制造性评价技术、老旧装备剩余寿命评估与再制造装备的寿命预测技术、再制造过程的模拟与仿真技术、再制造“毛坯”快速成形技术、装备战场备件制造与再制造移动平台技术、再制造过程的在线质量监控技术和再制造成品的检测与评价技术等。同时还要不断加强再制造技术体系研究,不断丰富和完善体系框架及内容,使其成为指导再制造产业发展的技术支撑。

参考文献

- [1] 徐滨士. 装备再制造工程的理论与技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 1.
- [2] 徐滨士. 绿色再制造工程及其关键技术 [J]. 再生资源与循环经济, 2009, 2(11): 5-8.
- [3] 朱胜, 姚巨坤. 再制造技术与工艺 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [4] 徐滨士. 再制造工程与自动化表面工程技术 [J]. 金属热处理, 2008, 33(1): 9-14.
- [5] 梁秀兵, 陈永雄, 白金元, 等. 自动化高速电弧喷涂技术再制造发动机曲轴 [J]. 中国表面工程, 2010, 23(2): 112-116.
- [6] 徐滨士. 中国再制造产业及再制造技术新进展 [J]. 热喷涂技术, 2010, 2(3): 1-6.
- [7] 胡振峰, 董世运, 汪笑鹤, 等. 面向装备再制造的纳米复合电刷镀技术的新发展 [J]. 中国表面工程, 2010, 23(1): 87-91.
- [8] 马世宁, 孙晓峰. 装备绿色维修的发展方向 [J]. 中国表面工程, 2006, 19(55): 36-42.
- [9] 张庆, 杨军伟, 孟令东, 等. 零件再制造中局部损伤的治理方法 [J]. 中国表面工程, 2012, 25(1): 110-114.
- [10] 杨军伟, 张庆, 孟令东. 类激光高能脉冲精密冷补技术用于铸造缺陷的修复 [J]. 铸造技术, 2011, 32(5): 622-625.

作者地址: 北京市丰台区杜家坎 21 号

100072

装甲兵工程学院

Tel: (010) 6671 8874

E-mail: sxfl9999@126.com