

绿色再制造工程在军用装备中的应用

徐滨士, 马世宁, 刘世参, 朱 胜, 王海斗

(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:绿色再制造工程是一门新兴学科和一项朝阳产业,是对维修工程的继承和发展。本文从绿色再制造工程的内涵、发展进程及关键技术等方面进行阐述。纳米表面工程技术是绿色再制造工程的关键技术,高速电弧喷涂技术、纳米电刷镀技术、纳米减摩自修复添加剂技术等先进的表面工程技术,大幅度提高了军用装备零部件的减摩、耐磨、抗疲劳、耐腐蚀性能。绿色再制造工程对加速旧武器装备的延寿和升级改造,对军队装备维修保障将起到重要作用。

关键词:绿色再制造工程;军用装备;表面工程;关键技术

中图分类号:E927 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2004)01-0001-05

20世纪全球经济高速发展的同时,人类对自然资源的任意开发和对环境的过度消耗造成了全球的生态破坏、资源短缺、环境污染等众多重大问题。其中包括武器装备制造在内的机电产品制造业是最大的资源使用者,也是最大的环境污染源之一。据统计,造成全球环境污染的70%以上排放物来自制造业,每年约产生55亿吨无害废物和7亿吨有害废物。1996年全球有2400万辆汽车报废,2000年全球有2000万台计算机被淘汰^[1],人类的生存条件受到严重挑战。

为了缓解有限资源和无限浪费之间的矛盾,减少废品对环境的危害,最大限度地利用废品中零部件的剩余价值,20世纪80年代以来,国际上掀起了一股绿色浪潮,提出了“绿色制造”的新概念。在这种形势下,绿色再制造工程得以产生并迅速发展。

1 绿色再制造工程的内涵

绿色再制造工程是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^[2],简言之,再制造工程是废旧产品高科技维修的产业化。绿色再制造工程的研究对象——“产品”是广义的。它既可以是装备、系统、设施,也可以是其零部件;既包括硬件,也包括软件。

绿色再制造工程既不同于装备维修,又不同于装备再循环(回收利用)。装备维修是军用装备在使用阶段为了使其保持良好状况而采取的技术措施,具有随机性、原位性、应急性和小批量性。而装备再制造是将大量已报废或即将报废的装备拆解后,按零部件的类型进行检测,以有再制造价值的零部件为毛坯,利用高新表面技术进行批量化修复,恢复并提升零部件性能。最后,将再制造后的各种零部件按与新品制造过程相似的严格装配工艺完成装配,以及试验检测,使其技术性能能达到甚至超过新装备。

装备再循环(回收利用)以回炉冶炼等加工方式,得到低品位的原材料,回收中需消耗较多的能源,并会造成二次环境污染。而装备再制造以报废装备中的成形零部件为毛坯,不需重新开模制造毛坯,最大限度地保留了零部件中蕴含的附加值,故不仅生产成本远低于新品,且减少了对环境的污染。

收稿日期:2003-12-20

基金项目: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973项目子项目(G1999065009);国家重大技术创新项目(98-014);中英政府科技合作项目(2002/209 M3);中波政府科技合作项目(283-20)

作者简介:徐滨士(1931-),男,黑龙江哈尔滨人,教授,中国工程院院士。

2 绿色再制造工程的发展

再制造工程在美国发展迅速。据统计^[3],1996年美国专业再制造公司已超过73 000家,雇员48万人,生产46种再制造产品,每年的销售额超过530亿美元。其中汽车再制造业最大,公司总数达5万家,年销售总额365亿美元,总雇员34万人。美国计划到2005年时,再制造业雇佣员工超过100万,年销售额达到1 000亿美元。图1(a)、(b)分别为美国1996年再制造业与钢铁业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,说明再制造业既能拉动国民经济,又能提高就业率。

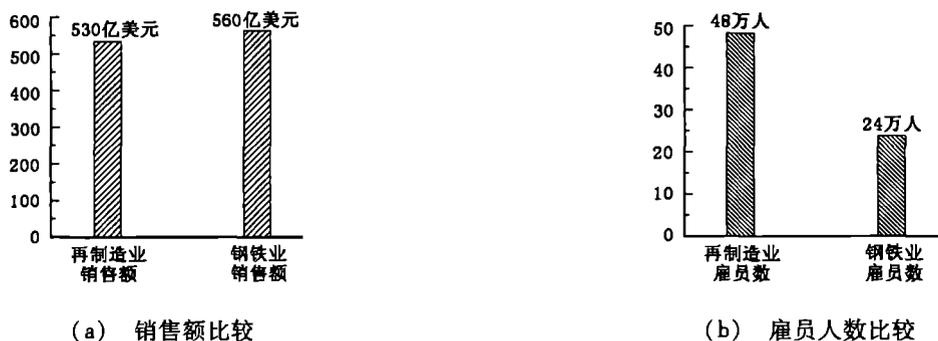


图1 美国再制造业与钢铁制造业的比较

再制造工程的快速发展受到了美国国防决策部门的重视。美国国防科学研究委员会在制订2010年国防工业制造技术框架时,将“新的再制造技术”和“有利于装备延寿的设计方法”列为重点发展的核心研究方向之一。

美军是再制造的最大受益者。美军的车辆和武器通常使用再制造部件,不但节约了军用装备的制造费用,而且延长了装备的寿命并提高了装备的维修能力。美军F-16战斗机从研制到生产只用了3年时间,奥秘之一是充分利用再制造技术,对废旧件的再制造、再利用。美军B-52轰炸机于1961年~1962年生产,1980年、1996年两次进行再制造工程技术改造,改造后的性能又得到大幅度提高,预计服役年限可到2030年。

再制造工程在我国已开始起步。从1995年起,不断有企业及研究单位加入再制造的实践活动与理论研究中来,如济南“复强”、上海“大众”等企业的再制造发动机年产量已突破万台,装甲兵工程学院等院校已建起了较完整的再制造学科体系。中国工程院2000年咨询报告《绿色再制造工程及其在我国应用的前景》受到了国务院领导及部委机关的高度重视;《废旧机电产品资源化》课题被列为2002年中国工程院咨询项目;《再制造基础理论与关键技术》被列为2003年国家自然科学基金重点资助项目;2003年8月,科技部和工程院在制定国家2020年中长期科学技术发展规划第三专题《制造业发展的科技问题研究》时,将“机械装备的自修复与再制造”列为关键技术之一。

再制造工程也得到了我军的高度重视。2001年,《装备延寿与再制造工程技术》等一批再制造课题被总装列为“十五”预先研究项目。同年,《纳米电刷镀技术在重点部队的推广应用》、《纳米减摩材料在装甲车和运输车上的试点应用》等一批再制造关键技术项目被列为总装维修改革项目。

上述事例表明,装备绿色再制造工程已经成为我国、我军新世纪的重要学科发展和产业化方向,这对我国抢占制造业科技发展制高点具有重大战略意义。

3 绿色再制造工程的关键技术及其在军用装备中的应用

再制造工程需要有具体的关键技术作为支撑。先进的表面工程技术,尤其是纳米表面工程技术是再制造工程最重要的关键技术之一。

表面工程,是指对材料(金属材料、陶瓷材料、高分子材料、复合材料)表面进行涂覆、改性等技术处理,以改变材料表面的形态、化学成分、组织结构和应力状态,获得所需要表面性能的系统工程^[4]。表面工程的基本特征是综合、交叉、复合、优化,它以“表面”为研究核心。表面工程的最大优势是能够以多种方法制备出优于本体材料性能的表面功能薄层,赋予零件耐高温、防腐蚀、耐磨损、抗疲劳、防辐射等性能。这层表面

材料与制作部件的整体材料相比,厚度薄,面积小,但却承担着工作部件的主要功能。

传统的表面工程关键技术包括热喷涂、电刷镀、激光熔覆、气相沉积以及“三束”(激光束、离子束、电子束)表面改性等。随着纳米技术的发展,纳米材料不断应用于表面工程之中,纳米表面工程应运而生。所谓“纳米表面工程”是指充分利用纳米材料的优异特性提升改善传统表面工程技术的性能,进一步改变固体材料表面的形态、成分、结构等,从而赋予表面全新功能的系统工程。

3.1 高速电弧喷涂技术对军用装备的修复与再制造

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^[5-6]。高速电弧喷涂层的组织结构和涂层性能比传统电弧喷涂层有了很大改善,主要表现在涂层组织致密,孔隙率低,结合强度高,涂层耐磨性能明显提高^[7]。

高速电弧喷涂层的表面粗糙度和氧化程度都明显比传统电弧喷涂层小。观察与检测发现,传统电弧喷涂层中形变颗粒周围存在较大的破碎氧化物颗粒和连续的氧化物膜,这与普通电弧喷涂过程中雾化颗粒较大,气流速度的加速能力小,颗粒飞行速度较低有关。由此可知,高速电弧喷涂层能够更有效地提高材料的耐磨、耐蚀和抗疲劳性能^[8]。

高速电弧喷涂技术成功用于军用装备的修复与再制造。某型猎潜艇在高温、高湿、高盐雾环境下,艇体钢结构 4~5 年即被腐蚀穿孔,7~8 年中修时的换板率高达 50%。利用高速电弧喷涂对钢结构表面喷涂纯铝及铝合金涂层,实际航行一年后检测发现,钢结构完好无损。据测算,喷涂后的钢结构防腐寿命将超过 15 年。高速电弧喷涂技术还用于解决舰船甲板的防滑问题,通过对甲板表面喷涂 Al_2O_3 防腐、防滑复合粉芯丝材,在甲板表面得到了一层既有优异的防腐性能,又有显著的抗磨和防滑性能的复合涂层,实际应用后效果非常明显^[9]。

3.2 纳米电刷镀技术对军用装备的修复与再制造

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了特种纳米颗粒,使得刷镀层性能显著提高的新型电刷镀技术。纳米电刷镀技术的核心难题是纳米颗粒在镀液中的分散与悬浮稳定问题,装备再制造技术国防科技重点实验室通过独创的高能机械化学法成功地解决了这一难题。

图 2(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^[10],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 2(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。这样,在复合刷镀层受载变形时纳米颗粒可以起到明显的阻碍位错运动和微裂纹扩展的作用。在服役温度升高时,纳米颗粒可以有效阻碍晶粒长大和再结晶。

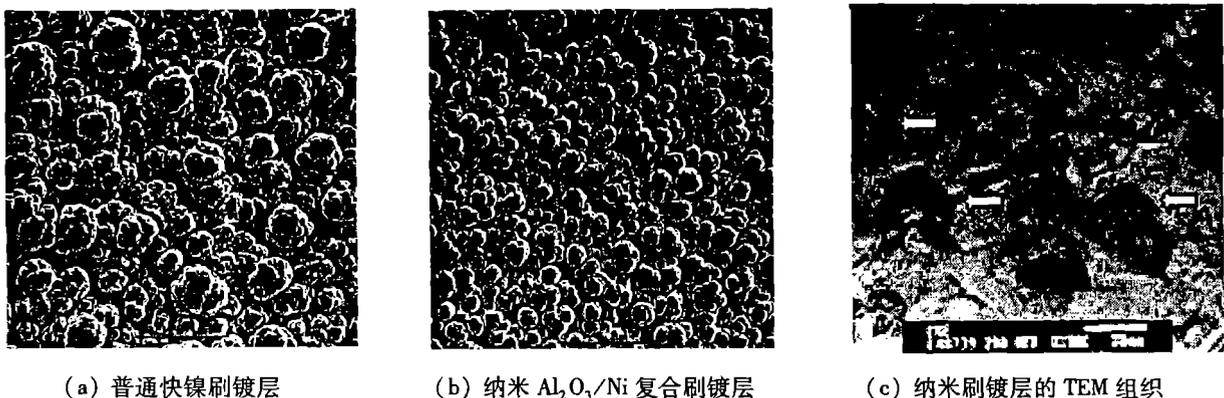


图 2 纳米电刷镀层的表面形貌及 TEM 组织

图 3 为镍基纳米 Al_2O_3 电刷镀层与普通快速镍镀层硬度随温度变化图,可见前者的高温硬性明显优于后者。普通快速镍镀层当温度超过 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 时硬度即迅速下降,而镍基纳米 Al_2O_3 镀层当温度升至 $400\text{ }^\circ\text{C}$ 时依然保持稳定的硬度,且在 $600\text{ }^\circ\text{C}$ 高温下仍具有较好的硬度。说明纳米电刷镀层在高温下可持续发挥耐磨作用。

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 5 000 余万元,创造了巨大的军用和经济效益。

纳米电刷镀技术还解决了舰船、潜艇等关键零部件的维修难题,修复了某型舰艇进口设备中直径达 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。纳米电刷镀技术还在主战坦克关键零部件的修复及军用机床再制造方面发挥了重大作用,使得坦克侧减速器主、被动轴等关键零部件的寿命显著延长,并使军用机床的工作性能明显提高。

3.3 纳米减摩自修复添加剂技术对军用装备的修复与再制造

纳米减摩自修复添加剂技术是一种通过摩擦化学作用来实现材料减摩、自强化、自愈合、自修复的技术。将含有纳米颗粒的复合添加剂加入到润滑油中,纳米颗粒随润滑油分散于各个摩擦副接触面,在一定温度、压力、摩擦力作用下,摩擦副表面产生剧烈摩擦和塑性变形,发生摩擦化学作用,添加剂中的纳米颗粒就会在摩擦表面沉积,并与表面作用,填补表面微观沟谷,从而形成一层具有抗磨减摩作用的液态或固态自修复微区膜。

装备再制造技术国防科技重点实验室首先开发出了微米减摩自修复添加剂 M3,在其基础上,通过配加纳米金属 Cu 颗粒又开发成功了具有自主知识产权的纳米减摩自修复添加剂 M6。M6 的减摩、抗磨性能好,成本低,污染少,自修复效果明显,被总装备部指定为军用车辆装备自修复的首选添加剂之一。

纳米减摩自修复添加剂技术已用于军事装备的修复与再制造,取得了良好的效果。某型主战坦克,常年满负荷训练使用,由于零部件老化,气候恶劣,加之操作不当等人为因素,发动机经常发生故障,影响了正常的训练任务。使用纳米减摩自修复添加剂 M6 以后,发动机的润滑状态明显改善,磨损降低,动力性提高,机油消耗减少。

在国外,减摩自修复添加剂技术也已得到广泛应用。俄罗斯将该技术用于舰船、坦克、装甲车动力装置上,节省了燃油,延长了寿命,降低了潜艇运行噪音。应用于火炮后,炮膛来复线和内表面的晶格结构发生变化,弹膛阻力减小,内表面的耐磨性提高,炮管的使用寿命增加一倍,炮弹射程增加 20%。

以纳米电刷镀技术、纳米减摩自修复添加剂技术为代表的纳米表面工程技术已取得了很大进步,虽然涂层中加入的纳米颗粒数量并不多,但维修与再制造效果非常显著,说明纳米材料对提升表面工程技术具有重要作用。尽管如此,纳米表面工程技术还只处在初级阶段,通过纳米表面工程得到的表面复合涂层,还不是真正意义上的纳米涂层,而只能称为纳米结构涂层。不过,这些纳米结构涂层还是具备了一定意义上的纳米特征,如涂层中复合有弥散分布的单质纳米颗粒,涂层的某些局部由纳米晶构成,或者涂层的部分最小组成单元为纳米级团聚物等。

4 结论

1)绿色再制造工程是以产品全寿命周期理论为指导的废旧产品再生的系统工程,它对节能节材、减少污染、提高装备性能等具有重要作用。

2)绿色再制造工程是一门新兴学科和一项朝阳产业,受到了国内外的高度重视。我国的再制造工程发展刚刚起步,但在我国政府、军队、学术界和企业界的共同努力下,现正以良好的势头加速度发展。

3)以纳米表面工程技术为代表的先进再制造工程关键技术,在提升军事装备维修性能,促进军事装备的高技术再制造方面发挥了重要作用。但是纳米表面工程还处在初级阶段,随着纳米科技和表面工程的不断发展,它必将发挥更大作用。

参考文献:

[1] 清华大学. 中国环境污染状况备忘录[J]. 世界环境, 1998, (2): 40-42.

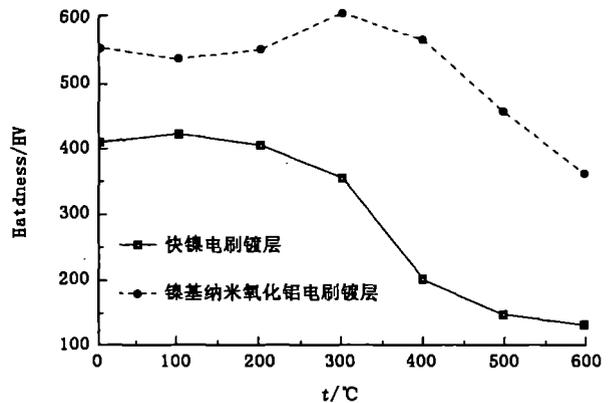


图3 纳米电刷镀层与快镍镀层硬度随温度的变化

- [2] 徐滨士, 张伟. 现代制造科学之21世纪的再制造工程技术及理论研究[A]. 国家自然科学基金委员会机械学科前沿及优先领域研讨论文集[C]. 北京:机械工业出版社,1999.
- [3] Robert T,Lund. The Remanufacturing Industry - Hidden Giant[M]. Boston Univesity Press,1996.
- [4] 徐滨士. 表面工程与维修[M]. 北京:机械工业出版社,1996.
- [5] Sampson E. Advances in Thermal Spray Coatings Broaden Their Applications[J]. Welding Journal, 1993,(7);39-42.
- [6] Wang B. Elevated Temperature Erosion Resistance of Several Experimental Amorphous Thermal Spray Coatings [A]. Proceedings Of the 15th International Thermal Spray Conference[C]. Nice:France, 1998.
- [7] 梁秀兵, 徐滨士, 马世宁. 高速电弧喷涂特性测试与分析[J]. 机械工程学报,2002, 38(2): 57-60.
- [8] Zhu Zi-xin, Xu Bin-shi, Ma Shi-ning, et al. Sliding Wear Behavior of High Velocity Arc Sprayed Fe-Al coating[J]. CHINA WELDING,2003, 12(1): 1-5.
- [9] 杨春海. 高速电弧喷涂防滑耐磨防腐涂层研制[M]. 北京:装甲兵工程学院,2000.
- [10] Xu Bin-shi, Liang Xiu-bing, Dong Shi-yun, et al. Progress of Nano-Surface Engineering[J]. International Journal of Materials & Product Technology. 2003, 18(4): 338-343.

(编辑:门向生)

Applications of Green Remanufacturing Engineering to Military Equipment

XU Bin-shi, MA Shi-ning, LIU Shi-can, ZHU Sheng, WANG Hai-dou

(Engineering Academy of Armour Force, PLA National Key Laboratory for Remanufacturing, Beijing 100072, China)

Abstract: Green remanufacturing engineering is a new subject and promising ind. and simultaneously it is an inheritance and a development to maintenance engineering. The main aspects such as connotation, the course of development and key technology in green remanufacturing engineering are introduced in detail in this paper. The nano surface engineering is a key to the technology of green remanufacturing engineering. Some advanced technologies such as high velocity arc spraying, nano electric brush plating and nano antifriction self-repairing additive are studied to improve excellently the properties of antifriction, wear resistance and anti-corrosion of the component. The remanufacturing engineering is an important part of advanced manufacture engineering.

Key words: green manufacturing engineering; military equipment; surface engineering; key technology