

doi: 10.7690/bgzdh.2014.01.007

## 舰船装备海上维修对表面工程技术的需求

史跃东, 李军华

(海军工程大学科研部, 武汉 430033)

**摘要:** 为提升舰船装备海上维修能力, 采用任务能力分解方法, 开展了表面工程技术在海上维修中的应用研究。在对现阶段装备维修中广泛采用的表面工程新技术详细分析的基础上, 围绕舰船装备海上维修过程中存在的备件精确化保障难度大、经费支撑有限、伴随维修保障能力亟待提高等诸多问题, 开展舰船装备海上维修的表面工程技术需求分析及案例研究工作。分析研究表明: 传统的“前换后修”维修模式不足以完全满足舰船装备的海上维修需求, 在远洋舰船编队(或本船)的维修设备配置中选配基于表面工程新技术的先进维修设备能够实现装备零部件的现场快速修复及成形再制造, 有效解决海上维修面临的备件携行空间有限、经费不足、筹措困难等难题, 是强化舰员级维修能力、提升海上伴随维修保障能力的一项重要手段。

**关键词:** 舰船装备; 海上维修; 表面工程; 需求分析

**中图分类号:** TJ83 **文献标志码:** A

## Requirement Analysis About Surface Engineering Technology in Ship Equipment Marine Repair

Shi Yuedong, Li Junhua

(Department of Scientific & Research, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** In order to advance the maintenance capacity at sea, the research about surface engineering technology used in maintenance at sea is developed based on mission capacity analyze method. The surface engineering technology is a new branch of equipment maintenance technology. Based on the detailed analysis of the new surface engineering technologies adopted widely in equipment maintenance currently, some problems emerged in ship equipment marine repair were pointed out, such as the high difficulty for store support accurately, the limited outlay for stock, and the lower capacity for concomitance maintenance support at sea. Then the demand about surface engineering technology in ship equipment marine repair was analyzed and application case was provided. The results show that the conventional replacing maintenance pattern can't meet the demand of ship equipment marine repair. However, employing the maintenance equipment based on surface engineering technology between maintenance equipments used to support oceangoing ship formation can realize the fast repairing and reproducing of machine parts. So it can settle the difficult problems emerged in the repair at sea effectively, strengthen the maintenance capacity of sailors, and heighten the concomitance maintenance capacity at sea.

**Keywords:** ship equipment; marine repair; surface engineering; require ment analysis

### 0 引言

表面工程是指经表面预处理后, 通过表面涂覆、表面改性或多种表面工程技术复合处理, 改变固体金属表面或非金属表面的形态、化学成分、组织结构 and 应力状态, 以获得所需表面性能的系统工程<sup>[1]</sup>。现代化工业生产过程中, 在高速、高温、高压、重载、腐蚀介质等外在应力作用下, 设备及零部件的表面往往会出现磨损、腐蚀、高温氧化等局部损坏现象, 并最终导致设备及零部件的使用功能失效。表面工程技术则通过在受损基体表面制备出性能优于基体材料的功能性薄膜, 使设备及零部件具有比基体材料更高的耐磨性、抗腐蚀性和耐高温性。同时, 薄膜的厚度一般仅为基体结构尺寸的几百分之一, 因此即使采用性能优异的贵重、稀有元素, 相关制造成本也不会显著提高<sup>[2]</sup>。由此可见, 表面工

程技术是主导 21 世纪工业发展的一项关键技术<sup>[3]</sup>。

自 20 世纪 80 年代表面工程技术引入国内以来, 相关理论与技术已有长足发展。针对材料表面的失效机制, 以及表面工程的技术特点, 已初步形成较为成熟的基础理论体系, 包括表面失效分析理论、表面摩擦与磨损理论、表面腐蚀与防理论、表面结合与复合理论等。同样, 随着现代科技的发展, 传统的电刷镀、热喷涂、激光重熔、化学热处理、表面强化、多层薄膜等表面工程技术已在生产和实践中得到广泛应用, 并在节能、节材、降耗及复合表面技术等方面取得了重要进步<sup>[4-10]</sup>。

笔者在详细分析近阶段工程实践过程中广泛采用的纳米复合电刷镀、微束等离子熔覆、激光熔覆、自动化堆焊熔敷成形、类激光高能脉冲冷补、高速电弧喷涂、超音速等离子喷涂等表面工程新技术的

收稿日期: 2013-07-02; 修回日期: 2013-08-22

作者简介: 史跃东(1982—), 男, 辽宁人, 博士, 从事舰船装备综合保障研究。

基础上,围绕舰船装备的海上维修需求,尤其是远洋环境下的船用设备及零部件维修需求,开展表面工程技术在舰船装备海上维修中的需求及应用研究工作。旨在通过将表面工程技术和维修工程技术的有机结合,弥补现存舰船装备海上维修方式及能力的不足,以求进一步提升远洋环境下船用设备及零部件的维修技术水平。

## 1 表面工程新技术

### 1.1 纳米复合电刷镀技术

纳米颗粒复合电刷镀技术是一种新兴的复合镀层制备技术,是在电刷镀液中加入一种或几种纳米颗粒,使之在电刷镀过程中电场作用下金属离子被还原的同时与金属发生共沉积,从而获得具有特定优异性能复合镀层的技术,适用于损伤超差较小、对配合度要求较高的轴类及内孔类零件局部修复。

技术特点:1) 设备简单(仅需电源、镀笔、镀液及相关配件),便于携带,适用于海上及现场不解体修复;2) 工艺简单,操作灵活,沉积速度快,修复周期短,费用低,经济效益大;3) 与纯镍镀层相比,显微硬度提高了 20%~50%,耐磨性能是纯镍镀层的 1.5~2.5 倍,在 60 N 和 140 N 载荷下的抗接触疲劳性能提高到  $10^6$  周次(纯镍镀层为  $10^5$  周次);4) 镀层服役温度提高至 400 °C 以上(一般镀层为 200 °C);5) 应用范围更广,普通电刷镀不能修复的重载荷、交变载荷和较高温度工况下的装备零(部)件,采用纳米颗粒复合电刷镀技术可部分修复。

### 1.2 微束等离子熔覆技术

微束等离子弧熔覆技术是以微束等离子弧为热源,将合金粉加热,在零件表面熔覆成形,恢复零件表面形状与性能的新型表面工程技术,适用于结构形状较复杂、结合强度要求高的薄壁类零件的局部修复。此项技术的实际应用多以“微束等离子熔覆快速维修成形系统”的形式存在,系统由电源、操作机、变位机、送粉系统及供气系统等设备组成。

技术特点:1) 集成度高,柔性好,工艺多样灵活;2) 可完成等离子弧直流焊、直流脉冲焊、变极性等离子弧焊、等离子熔覆等多种焊接工艺,并具备填丝(热丝及脉动送丝)和送粉 2 种填充金属方式;3) 可实现铝合金、钢材料、高温合金等金属材料结构件的表面修理及焊接制造工艺。

### 1.3 激光熔覆技术

激光熔覆技术是利用高能激光束作热源,将金属粉末快速熔化并凝固,逐层堆积成形,完成对废旧零件再制造的技术,适用于结构较复杂、要求冶

金结合、抗疲劳性能好的齿类、轴类关键零件的局部修复。此项技术的实际应用多以“三维损伤激光熔覆系统”的形式存在,系统由激光器、机器人、冷水机和送粉器等设备组成。

技术特点:1) 可对平面类零件、轴类零件、薄壁圆筒类零件的损伤表面进行修复;2) 技术拓展后可实现激光切割、焊接、冲击、表面复合处理、喷涂、重熔等多种功能。

### 1.4 自动化堆焊熔敷成形技术

自动化堆焊熔敷成形技术是以缺损零件为研究对象,通过激光扫描等反求手段,获得零件的缺损模型,采用熔化极气体保护焊等堆焊成形工艺恢复零件的尺寸及性能的成形技术。此项技术的实际应用多以“机器人自动化堆焊熔敷成形系统”的形式存在,系统由三维激光扫描仪、数字化脉冲焊接电源系统、三轴二联动数控铣床和机器人等组成。

技术特点:1) 智能化程度高;2) 成形速度快;3) 修补精度高;4) 适应范围广。

### 1.5 类激光高能脉冲冷补技术

类激光高能脉冲精密冷补技术是采用断续高能电脉冲,在电极和工件间形成瞬时电弧,使修补材料和工件迅速熔结,达到冶金结合,以实现对精密工件表面缺陷的修复。

技术特点:1) 焊补精度高。通过对输出电流、时间的精确控制,最小焊补量达 0.2 mm;2) 焊补冲击小。采用脉冲电流,能量集中,作用时间短,焊补应力和焊后变形小;3) 热影响区小。对基体热输入量小,基材性能无退化,无宏观热变形;4) 结合强度高。基体与补材为冶金结合,适用各种加工方式,不会出现结合不牢固、脱落等现象;5) 焊补材料要求低。对焊补材料没有特殊的要求,普通氩弧焊焊条均可用作焊补材料;6) 操作工艺简单。工艺简便,可实现手工操作及自动化控制,只需简单培训即可;7) 应用范围广。可实现精密件修补,磨损、裂纹及缺损焊补,异形表面修补,局部不解体现场修补等。

### 1.6 高速电弧喷涂技术

高速电弧喷涂技术利用 2 根连续送进的金属丝之间短路时产生的电弧,使金属丝熔化成熔滴,再由高速气流将其雾化并高速喷射至工件表面形成涂层,适用于结构形状较简单,腐蚀、磨损超差较大,以及对修复效率要求较高零件的局部修复。该技术

的关键是防腐蚀、耐磨损和耐高温冲蚀3类新型喷涂材料的开发和喷涂修复工艺的优化研究。

技术特点：1) 工作效率高；2) 适应范围广；3) 可实现现场作业。

### 1.7 超音速等离子喷涂技术

超音速等离子喷涂是以高温的超音速等离子射流为热源，借助等离子射流来加热、加速喷涂材料，使喷涂材料达到熔融或半熔融状态，并高速撞击经预处理的零件表面，经扁平凝固后形成强化防护层的一种工艺方法。

技术特点：1) 工作能耗低，在较低能耗下可获得高能量密度、高稳定性的超音速等离子射流；2) 涂层质量好，采用内送粉结构，改善了粉末的熔化状况，提高了涂层沉积率；3) 喷枪工作电压适用范围宽(60~220 V)；可使用工作气体种类多(Ar、N<sub>2</sub>、Ar+H<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>)；4) 喷枪体积小、重量轻，可维护性、可操作性强，能实现手持和机装2种作业功能。

## 2 新技术在舰船装备海上维修中的需求分析

长期的工程实践表明，远洋航行过程中舰船经常会发生各种各样的机械设备故障，其中有些故障可能会严重影响舰船装备的生命力水平，进而导致舰船执行任务能力的下降或丧失，因此有必要在海上这一特殊环境下完成相关舰船装备及其零部件的维修工作。与之不相适应的是，目前阶段国内大部分舰船装备的远洋维修多采用“前换后修”的工作模式，且以换件修理为主要维修方式。采用此种维修模式的优点为维修工作效率高、对维修人员的技术水平要求不会过高，但鉴于其过分依赖故障件的备件储备，在备件携行种类、数量有限，或经费不足以支撑期望备件购置水平的状况下，“前换后修”的工作模式并不能完全满足舰船装备的海上维修需求，装备故障件的现场修复及再制造能力亟待进一步提高。而将表面工程新技术与维修工程技术有机结合，可有效克服上述维修困难，因此被广泛应用于海上维修工程领域。

### 2.1 弥补备件精确化保障难度大的不足

国内外的装备备件携行保障实践表明，“带的没用上、用的没带上”是备件保障模式面临的最为突出的难题。例如，美海军海上系统司令部对舰载备件进行统计分析发现，舰艇海上航行过程中，一方面所需要的备件60%得不到满足；另一方面携行的舰载备件92%却用不上。此外，国内舰船装备零部

件种类多、型号杂、标准化程度低、通用性差等特点，也给舰船远航携行备件种类、数量的确定带来了一定难度。采用基于表面工程新技术的先进维修设备，仅需在舰船上储备一定数量的维修用金属粉末，即能实现故障件的现场快速修复及再制造，可有效解决舰船装备备件精确保障难度大的问题。

### 2.2 满足优化维修保障费效比的需求

国内舰船装备的机械化、信息化含量日趋增高，新型装备的备件保障多具类型多、数量大、价格贵的特点，备件保障经费紧张、资源短缺、配置使用不合理等现象日益突出。如何实现有限经费支撑下的维修用备件最优配置一直是困扰舰船装备维修保障人员的一个长期难题。通过采用表面工程新技术中的装备零件快速成形再制造技术，可实现“需要即获取”的新型备件保障方式，减少携行备件的种类和数量，尤其是减少附加值高的备件海上携行数量，从而显著降低备件购置费用，有效提高舰船装备的维修保障费效比。

### 2.3 提升舰船装备海上维修能力的重要手段

实际上，即使维修保障的经费供给充足，且相关舰船也有能力携行足够种类、数量的备品备件，仍不足以有效解决远洋环境下的舰船装备维修难题。一方面鉴于我国的特殊国情，现役舰船或多或少的都存在部分引进设备，有些甚至还有国内已淘汰停产的超寿设备，这些设备的备件保障多无顺畅高效的筹措渠道，海上一旦发生致命损伤很难通过换件维修方式恢复故障件功能；另一方面，也更为重要的是，国内舰船装备维修保障多注重于舰员级维修保障能力建设，面向海上伴随保障的维修能力建设基础还较薄弱。然而长期的远航实践表明：海上舰船装备发生故障的种类往往具有不可预见性，许多故障必须依靠海上伴随维修保障力量才能顺利排除；因此，为全面提升舰船装备的海上维修保障能力，除继续强化以换件维修模式为主的舰员级维修保障能力建设外，还应进一步完善舰船装备的海上伴随维修保障能力建设。

完善舰船装备伴随维修保障能力的手段众多，涉及保障设备配置、设施建设、人员培训等多个方面，其中在远洋舰船上增配以表面工程新技术为主导的先进维修设备，可实现多类装备维修备件的现场快速成形再制造，有效解决因备件携行空间有限、经费不足、筹措困难等带来的一系列舰船装备海上维修难题，因此是众多提升舰船装备海上伴随维修

保障能力手段中的一类重要手段。

### 3 基于新技术的海上维修设备配置案例

笔者以某型远洋伴随保障船的维修保障系统修理设备配置方案为例,详述表面工程新技术在舰船装备海上维修中的应用情况。

某型伴随保障船承担着某舰船编队的远洋伴随补给保障和维修保障任务,其中维修保障任务主要依托伴随保障船上配置的维修保障系统实现。为较全面满足编队内各型舰船装备的海上维修保障需求,需科学、合理地开展维修保障系统修理设备配置工作。这里重点围绕维修保障系统中的机械装备修理分系统以及与表面工程新技术相关的修理设备配置情况进行说明。

机械装备修理分系统是维修保障系统中的一类重要分系统,其职能是完成编队内舰船机械设备的原位、离位故障修理,及状态监测、故障诊断、故障排查等修理先期技术活动,预期形成修理能力为:

- 1) 具有将板、柱、块、管状等普通金属或非金属材料、半成品等加工制作成结构较为复杂、精度较高的机械零部件和维修工装具的能力;
- 2) 具有较高等级的焊接与焊补能力,能够对具有特殊材料或较薄厚度等特征的壳体、管子或冷却器等破损进行焊接或焊补;
- 3) 具有对拆装过程较为复杂、装配精度要求较高的部套件进行拆装、更换及调试的能力;
- 4) 具有对柴油机、汽轮机、燃气轮机、电机、风机、水泵等复杂机械设备开展状态监测和故障诊断、异常状态检查和一定的调整恢复的能力;
- 5) 具有对装备战损零部件的现场快速修复及成形再制造能力。

基于上述维修能力要求,对各型机械维修专用、通用设备进行权衡优化选择,最终可获机械装备修理分系统修理设备配备清单,如表 1 所示。

如表 1 所示,纳米复合电刷镀、微束等离子熔覆、激光熔覆、自动化堆焊熔敷成形等表面工程新技术是确保该型伴随保障船的维修保障系统具备“舰船装备战损零部件现场快速修复及成形再制造能力”的关键技术,在整个维修保障系统修理设备配置中占据着不可或缺的重要地位。同时,类激光高能脉冲精密冷补、微束等离子焊、高速电弧喷涂等表面工程新技术也是对电焊、氩弧焊、MIG 焊等常规焊接修理技术的有效补充。由此可知,在该型伴随保障船上配置基于表面工程新技术的修理设备

是完善和提升舰船装备海上伴随维修保障能力的一项重要措施,不容忽视。此处给出的维修设备配置方案,亦可为其他类似舰船编队的伴随保障维修设备配置提供技术参考。

表 1 机械装备修理分系统修理设备配备清单

能力 编码	配备设备	表面工程设备
1	多功能(数控)车床(包括:车削、钻削、刨削、铣削)、钳工工作台、台虎钳、钻床、键槽加工机、线切割机床、除尘砂轮机、微型钻铣床	
2	氩弧焊机、电焊机、数字式 MIG 焊机、脉冲冷补机、微束等离子焊机、高速电弧喷涂机	脉冲冷补机、微束等离子焊机、高速电弧喷涂机
3	拆装工作台、台虎钳、超声波液压清洗机、清洗槽、电机烘箱、电机水煮箱、电机浸漆桶	
4	电机故障检测仪、示波器、相序测试仪、振噪频谱分析仪、轴承诊断仪、超声无损检测仪、涡流无损检测仪、高精度孔探仪、现场动平衡仪、红外测温仪	
5	纳米复合电刷镀套件、微束等离子熔覆快速维修成形系统、三维损伤激光熔覆系统、机器人自动化堆焊熔敷成形系统	纳米复合电刷镀套件、微束等离子熔覆快速维修成形系统、三维损伤激光熔覆系统、机器人自动化堆焊熔敷成形系统

### 4 结论

1) 舰船装备的海上工作和维修环境复杂,传统的“前换后修”维修模式虽能解决部分舰船装备的海上常发故障,但鉴于备件筹措的精确化保障难度大、经费支撑有限等问题,仍不足以完全满足舰船装备的海上维修需求,部分装备的海上伴随维修保障能力亟待提高。

2) 表面工程技术作为一门新兴装备维修技术,能够实现多类装备零部件的现场快速修复及成型再制造,有效解决因海上备件携行空间有限、经费不足、筹措困难等带来的维修难题,是强化舰员级维修能力,提升海上伴随维修保障能力重要手段。

3) 为较全面地满足舰船装备的海上维修需求,完善海上伴随保障维修能力,有必要在远洋舰船编队(或本船)的维修设备配置中选配基于表面工程新技术的先进维修设备。

### 参考文献:

[1] 师昌绪. 表面工程与维修[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996: 1-4.  
 [2] 徐滨士, 马世宁, 刘家浚. 表面工程的发展[J]. 电镀与涂饰, 1998, 17(1): 42-47.  
 [3] 师昌绪, 徐滨士, 张平, 等. 21 世纪表面工程的发展趋势[J]. 中国表面工程, 2001, 14(1): 2-7.