

机械零件维修与再制造表面质量分析与检测^{*}

谭 俊, 兰 龙, 马世宁

(装甲兵工程学院 再制造技术重点实验室, 北京 100072)

摘 要: 利用表面工程技术对失效零部件进行恢复性维修是对机械产品进行维修和再制造的重要手段。通常, 恢复性维修在零件表面增加了一个表面涂(覆)层, 因此, 检测零件维修与再制造过程中增加的表面涂(覆)层质量, 评价零件表面性能是否达到使用需求, 对确保机械零部件维修与再制造的质量具有重要的意义。文中从表面成分与结构分析、表面形貌与组织分析、表面残余应力检测、表面力学性能检测和表面耐腐蚀性能检测等五个方面阐述了机械零件维修与再制造表面质量分析与检测的内容, 介绍了常用的测试方法、设备及其特点, 重点介绍了表面质量分析和检测技术在利用真空镀膜、电刷镀、激光熔覆以及超音速等离子喷涂等先进表面工程技术制备涂层质量检测中的应用, 并给出了具体的应用实例。

关键词: 维修; 再制造; 表面质量; 检测

中图分类号: TH17

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2013)05-0103-08

Surface Quality Analysis and Measurement of Repaired and Remanufactured Mechanical Parts

TAN Jun, LAN Long, MA Shi-ning

(Science and Technology on Remanufacturing Laboratory, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072)

Abstract: The restorative maintenance of failure parts by surface engineering technologies is an important means of repair and remanufacturing of mechanical products. Usually, a new surface coating is obtained on the surface of repaired parts, so it is of great significance to ensure the quality of repaired and remanufactured parts by identifying the surface quality of the coating and assessing the surface properties of the parts. In this paper, surface quality analysis and measurement of the repaired and remanufactured parts were presented from different aspects of the surface composition and structure analysis, surface morphology and structure analysis, surface residual stress testing, surface mechanical properties testing and surface corrosion resistance testing. The test methods and equipment commonly used and their characteristics were introduced. It is focused that the surface quality analysis and measurement of coatings prepared by vacuum coating, brush plating, laser cladding and the supersonic plasma spraying and other advanced surface engineering technology. And several application examples were given.

Key words: repair; remanufacturing; surface quality; measurement

0 引 言

机械装备在服役过程中, 因零件的磨损、腐蚀与疲劳会带来装备性能的下降或失效。机械零件的维修与再制造是恢复和提升装备性能的重要手

段。机械零件的维修与再制造主要有 2 种方式, 一是对失效的零件进行更换, 即换件维修的方式, 这种方式的特点是更换的新件性能与原件的性能相同, 但维修成本较高, 且不利于环保; 二是利用

收稿日期: 2013-09-30; 修回日期: 2013-10-09; 基金项目: * 装备预研基金(9140C85020210OC85)

作者简介: 谭俊(1961-), 男(汉), 湖北宜昌人, 教授, 博士; 研究方向: 材料表面工程

网络出版日期: 2013-10-10 12:45; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20131010.1245.001.html>

引文格式: 谭俊, 兰龙, 马世宁. 机械零件维修与再制造表面质量分析与检测 [J]. 中国表面工程, 2013, 26(5): 103-110.

表面工程技术对失效的零件进行尺寸和性能恢复,使其接近或达到新件的技术要求,即恢复性维修方式,这种方式的特点是充分利用了旧件中所包括的剩余附加值,从而显著降低了维修成本,减少了资源的浪费,提高了环境友好性。因而对恢复性维修的机械零件的质量分析与检测就显得尤为重要。

一般而言,机械零件制造质量检测的内容主要包括两大部分,一是零件尺寸精度、形状位置精度和表面粗糙度的检测,二是零件性能的检测。机械零件维修与再制造质量的检测同样也包括以上两大部分,其中,零件尺寸、形状位置精度等的检测与其制造时的检测内容和方法基本相同,但零件性能的检测因零件维修与再制造过程中增加了表面涂(覆)层,与其制造时检测既有相似性,又具有特殊性,更加强调表面质量的分析与检测。从材料学的角度来看,机械零件维修与再制造表

面质量分析与检测的内容主要包括:表面成分与结构分析、表面形貌与组织分析、表面残余应力检测、表面力学性能检测和表面耐腐蚀性能检测等。

1 表面成分与结构分析

零件在尺寸恢复性维修与再制造中,由于维修与再制造的技术优势与特点,可选择与原零件相同的材料,也可选择比原零件更好的材料作为修复层。虽然涂层技术的不同,但修复层材料的成分与结构是决定修复层性能的重要因素。又由于修复层的厚度较薄,其成分与结构的检测技术不同于均质整体材料。常用的表面成分与结构的分析方法有 X 射线能谱分析(EDS)、X 射线波谱分析(WDS)、X 光电子谱分析(XPS)、俄歇电子谱分析(AES)及 X 射线衍射相分析(XRD)和电子衍射分析(ED)等。不同成分分析技术的特点见表 1。

表 1 不同成分分析技术的特点

Table 1 Characteristics of different analysis of composition

Analysis technics	Depth of the analysis/nm	Element /Atomic number(Z)	Accuracy of analysis/%	Analysis mode
EDS	500-2000	5(B)-92(U) Z≤11 Muting sensibility	1-5	Multielement
WDS	500-2000	4(Be)-92(U) Z≤11 Muting sensibility	1-5	Single element
XPS	2-3	Z≥3	0.1-1	Multielement、 Chemical valence
AES	0.5-2	Z≥3	0.1-1	Multielement

利用真空镀膜技术可修复磨损的精密零件,其修复的尺寸厚度一般在几个微米及以下。图 1 是在钢基体上离子镀 CrAlN 涂层沿深度方向的成分分析实例^[1],可以看出的涂层表面在大约 4 μm 深度的主要元素是 Cr、Al、N。在大约 3 μm 的表面可能形成了 CrAlN 涂层,在 CrAlN 涂层与基体(Fe)之间还有 1 μm 厚的 Cr 过渡。图 2 为真空沉积多层膜的成分分析实例,可以证实表面生成了 Ni/Cr 的多层结构。

在维修与再制造表面修复层的设计中,为提高零件表面的耐腐蚀性和耐磨性,有时会进行表面非晶涂层和纳米晶涂层的设计。图 3 为硫酸盐体系电沉积 Ni-P 镀层的 XRD 分析实例^[2],可以看出镀层在 45°附近形成的漫散峰,呈现出典型

的非晶特征,因而可以证实制备的表面涂层属非晶态结构。图 4 为纳米电刷镀 Ni/n-Al₂O₃ 的电

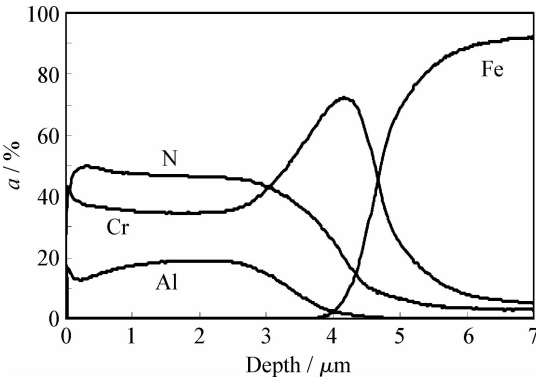


图 1 CrAlN 涂层成分 XPS 的分析^[1]

Fig. 1 Composition analysis of CrAlN coating by XPS^[1]

子衍射分析实例,电子衍射花样显示镀层由 Ni 的基体和纳米 Al_2O_3 颗粒组成。

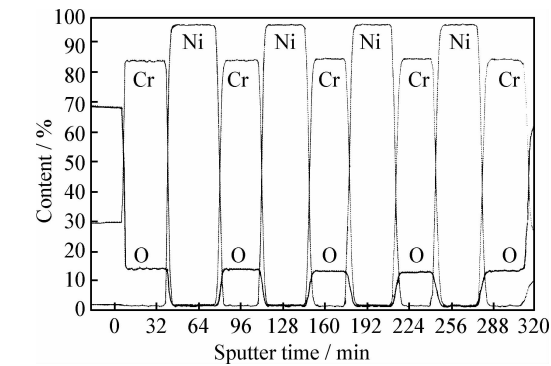


图 2 多层膜的成分沿深度分布的 AES 分析
Fig. 2 Depth distribution of composition of multi-layer films analyzed by AES

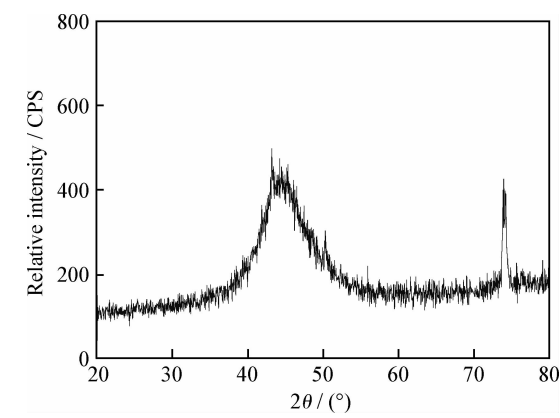


图 3 硫酸盐体系电沉积 Ni-P 的 XRD^[2]
Fig. 3 XRD pattern of Ni-P coating plated in sulfate electrolyte^[2]

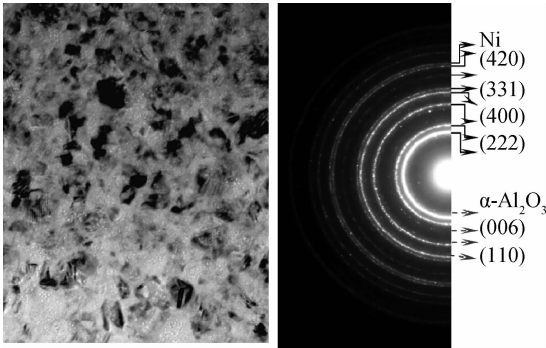


图 4 纳米电刷镀涂层的电子衍射图
Fig. 4 Electron diffraction patterns of nano electro-brush plating coating

2 表面形貌与组织分析

机械零件维修与再制造尺寸恢复涂层的制备,不仅要达到设计的成分和结构要求,还应达到相应的表面形貌与组织要求。对于不同表面涂层工艺,表面形貌与组织分析的内容要求不同,例如热喷涂层的孔隙率,纳米电刷镀层的晶粒尺寸和第二相分布,堆焊和激光熔敷层与热影响区的组织等。表面形貌组织的分析方法主要有光学显微分析、扫描电子显微分析、透射电子显微分析、激光显微分析等。光学显微镜与电子显微镜的特点见表 2。

图 5 为电刷层镍镀层在不同显微镜下的表面形貌和显微组织分析实例。可见在扫描电子显微镜,电刷镀镍镀层表面呈典型“菜花状”形貌;将其

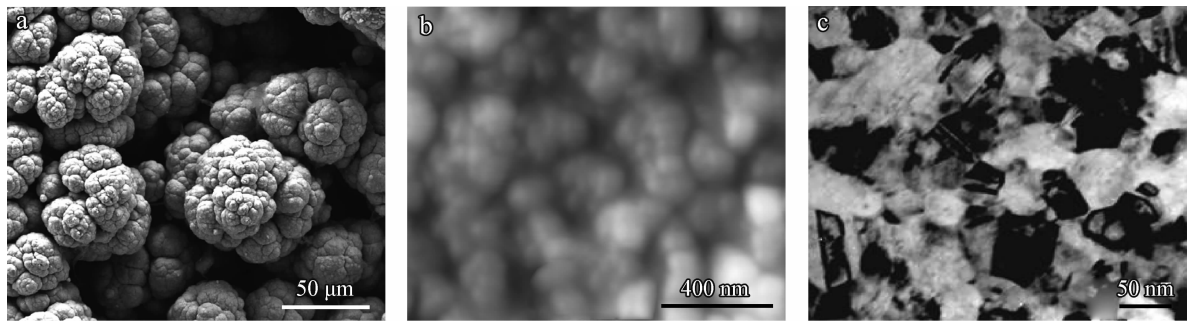
表 2 光学显微镜与电子显微镜的特点
Table 2 Characteristics of optical microscope and electron microscope

Item	Optical microscope	TEM	SEM
Radiographic source	Visible light	Electron beam	Electron beam
Wavelength	390-760 nm	0.038 8-0.000 87 nm	0.038 8-0.000 87 nm
Medium	Atmosphere	Vacuum	Vacuum
Lens	Glass lens	Electromagnetic lens	Electromagnetic lens
Resolution	200 nm(Visible light)	0.1-0.3 nm	1-3 nm
Magnification	Several-2000	Decades-Millions	Decades-Millions
Depth of field	Thin	Middle	Thick
Focus mode	Mechanical manipulation	Electromagnetic control, Computer control	Electromagnetic control, Computer control
Applicable situation	Porosity measurement	Microstructure analysis	Surface topography

表面抛光腐蚀后,在原子力显微镜下呈现出尺寸更小晶粒团束;将镀层制备为薄膜样品,在透射电子显微镜下显现出等轴的晶粒组织。

图 6 为通过等离子喷涂技术应用不同等离子输入功率在 Q235 基体上制备 Fe 基非晶涂层的

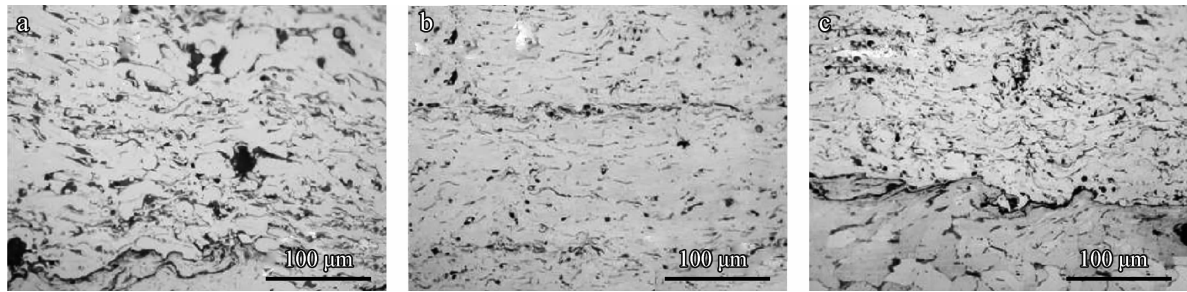
断面显微组织^[3],图中黑色区域为涂层孔隙。可以看出,等离子输入功率为 24.75 kW 时的孔隙率很高;当增大等离子输入功率至 30.25 kW 时,涂层的孔隙率明显降低;继续增大等离子输入功率至 35.75 kW 时,涂层孔隙率又有增大趋势。



(a) SEM (b) AFM (c) TEM

图 5 快速镍镀层的显微形貌

Fig. 5 Surface morphologies of fast-speed nickel electro-plating



(a) 24.75 kW (b) 30.25 kW (c) 35.75 kW

图 6 不同等离子输入功率时 Fe 基非晶涂层的断面微观组织^[3]

Fig. 6 Cross section microstructure of the Fe-based amorphous alloy coatings prepared at different plasma power^[3]

3 表面残余应力检测

当所采用的表面修复技术和工艺参数不同时,在零件表面会产生不同类型和大小的残余应力。对于承受疲劳载荷和冲蚀磨损的零件,表面残余应力将明显影响零件的性能。对于这类零件,修复与再制造后表面残余应力的是必须检测的内容。对于表面残余应力不能达到技术要求的零件,还要进行相应的表面处理,如去应力退火、喷丸、表面光整等,以改善零件表面的应力状态。表面残余应力的检测方法主要 X 射线应力分析法、翘曲残余应力分析法和金属磁记忆法等。不同残余应力分析法的特点见表 3。

X 射线应力分析法是目前国际上最流行,也是最准确可靠的残余应力测量方法。金属中的应力

测量是根据原子面间距大小反映应力大小的原理来实现的。通过 X 射线在分析部位的衍射来测量原子面间距,从而计算出金属表面的残余应力。

一般来说,在基材上沉积一层薄膜会造成试样整体结构翘曲,翘曲残余应力测试仪就是利激光束测量基材沉积后的结构翘曲,并运用 Stoney's equation 来计算薄膜应力。试样应满足如下 2 个条件:试样弯曲程度远小于基底厚度;膜层厚度远小于基底厚度^[4]。

金属磁记忆法技术是一种新的无损检测方法,其原理是利用铁磁性金属的磁致伸缩效应,在地磁环境下应力集中区内磁畴产生不可逆变化,由于应力集中处磁导率跃变,从而在其表面产生漏磁场,通过检测铁磁性金属表面的漏磁场便可无损、准确地确定铁磁性金属构件上的应力集

表 3 几种残余应力分析法的特点

Table 3 Characteristics of several stress analysis methods

Methods	Principle	Analysis object	Applicable situation
X-ray	Distortion of crystal lattice	Crystal materials	Thick coatings like electroplated layer, spray coating, overlay, etc.
Warping	Macro distortion	Unconstrained	Thin coatings by PVD,CVD, ect.
Metal magnetic memory testing	Changing magnetic fields	Ferromagnetic metal	Stress concentration position

中区,即工件上最危险的区域^[5]。

图 7 是激光熔覆多层堆积试样表面垂直激光扫描方向应力分布 XRD 分析测试实例^[6],可以看出,垂直激光扫描方向拉应力最大值出现在熔覆层中心,约为 230 MPa。基体主要受压应力,最大值出现在熔覆层与基体的交界处。图 8 是不同类金刚石薄膜(DLC)的应力分析实例^[7],可以看出 4 种工艺条件下获得的 DLC 膜表面形成的均为拉应力,当在 DLC 掺杂 Cr 时(4 号试样)的应力最低。

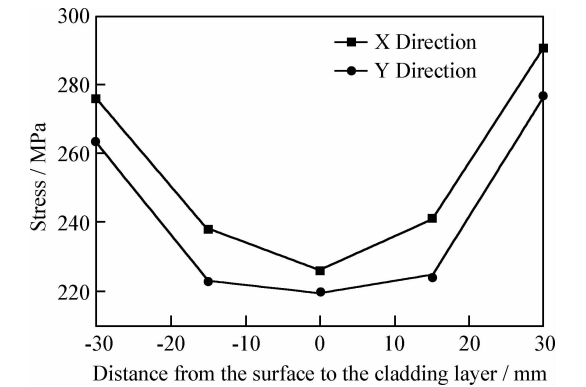


图 7 表面垂直激光熔覆方向应力分布^[6]

Fig. 7 Vertical stresses distribution of coating prepared by laser cladding^[6]

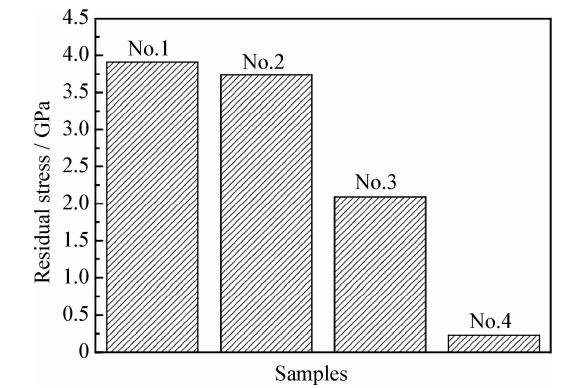


图 8 不同类金刚石薄膜样品的残余应力^[7]

Fig. 8 Stresses of different diamond like-carbon (DLC) film^[7]

图 9 是力致变形产生的磁记忆信号分析实

例^[8]。可以看出,铁磁试件承受轴向拉伸载荷后,磁记忆信号的法向分量 $H_p(y)$ 都出现了由负至正的变化,并存在 1 过零点。 $H_p(y)$ 信号曲线随载荷增大呈现逆时针转动趋势。

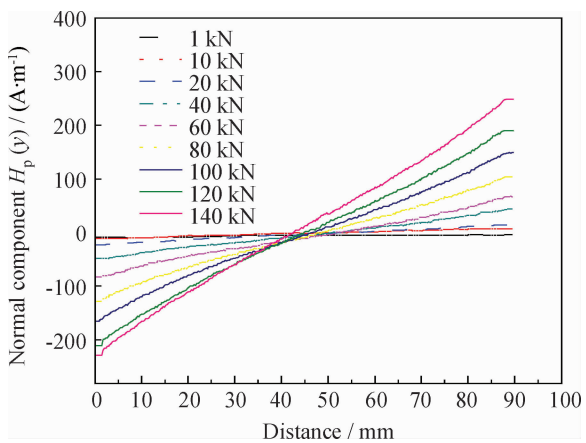


图 9 力致变形产生的磁记忆信号变化^[8]

Fig. 9 Variations of magnetic signals induced by applied load^[8]

4 表面力学性能的检测

表面力学性能的检测是维修与再制造零件质量评价的重要内容。表面力学性能检测的主要指标有表面硬度、摩擦因数、耐磨性等。这些是工程上最为关注指标。对于表面硬度的检测,根据涂层厚度不同,通常采用维氏硬度法、显微硬度法和纳米硬度法。零件表面摩擦因数与耐磨性的常用测试设备有 SRV 磨损试验机、UMT-3 多功能高温摩擦磨损试验机和 Revetest 划痕测试仪等。常用的硬度测试方法及特点见表 4。

图 10 是 Fe90 合金熔覆层截面显微硬度测试实例,可以看出熔覆层的硬度大约为 750 HV,明显高于基体的硬度,有可能提高修复零件的使用性能。图 11 为不同表面硬质涂层与铜摩擦因数系数测试实例,可见 CrN 涂层与铜的摩擦因数最低,可较好地防止钢质模具与铜加工件的黏着。

表 4 常用的硬度测试方法及特点

Table 4 Hardness testing methods commonly used and their characters

Methods	Brinell hardness	Rockwell hardness	Vickers-gardness	Microhardness	Nano-hardness
Indenter	Steel ball/ Sintered carbide ball	Steel ball/ Brale	Rectangular diamond pyramid	Rectangular diamond pyramid	Rectangular diamond pyramid
Load	15. 6-3 000 kg	60-150 kg	50-100 kg	0. 1-500 g	0. 1-500 mg
Test specification	8-450 HBS 450-650 HBW	60-85 HRA 25-100 HRB 20-67 HRC	10-9 000 HV	10-9 000 HV	10-9 000 HV
Applicable situation	≥10 mm	5-10 mm	1-5 mm	10-1 000 μm	≤10 μm

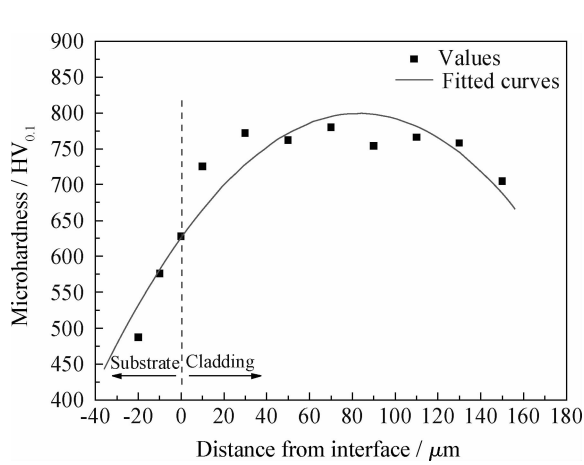


图 10 Fe90 合金熔覆层截面显微硬度^[9]

Fig. 10 Cross section microhardness of Fe90 alloy coatings prepared by laser cladding^[9]

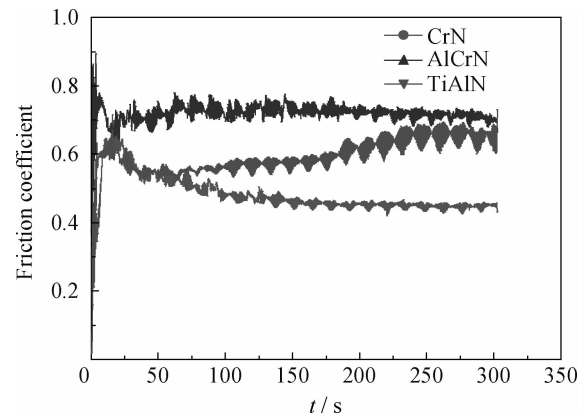


图 11 不同硬质涂层与铜的摩擦因数

Fig. 11 Friction coefficient of different hard coatings with copper

图 12 为丙烯酸/钢和聚氨酯/聚丙烯涂层体系表面摩擦力与线性增加的垂直载荷之间的关系^[10]。可以看出,在该划痕测试中硬基体(钢)比

软基体(聚丙烯)上涂层表面摩擦力小,载荷较大时更为明显。同时,小载荷(0~25 N)时表面摩擦力有一定波动,可能与涂层表面横向裂纹、粗糙度有关。大载荷(100~150 N)时表面摩擦力波动较大,可能与涂层黏着剥落有关。

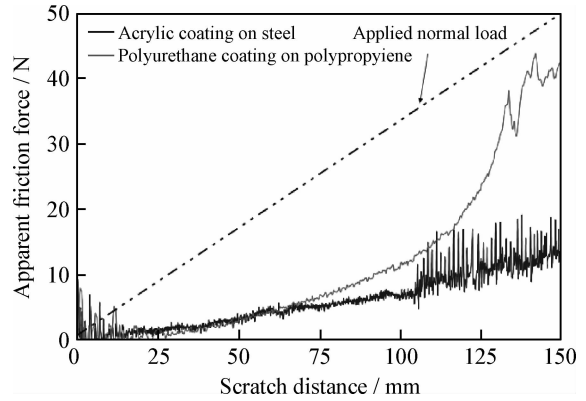


图 12 丙烯酸/钢和聚氨酯/聚丙烯涂层体系表面摩擦力与垂直载荷关系^[10]

Fig. 12 Apparent friction force versus applied normal load for the steel and the polyurethane-polypropylene coating systems^[10]

5 表面耐腐蚀性能的检测

对于表面有耐腐蚀要求的零件,修复与再制造后能否达到原技术要求,需要根据零件的腐蚀环境进行腐蚀性能的检测。通常腐蚀的环境有酸性、碱性、盐等,有的还有与应力与磨损复合的情况,如应力腐蚀和磨损腐蚀等。修复与再制造后表面耐腐蚀性能的检测方法有浸泡法、盐雾法、电化学腐蚀电流法、交流阻抗法等。

浸泡法与盐雾法是将零件放置于模拟的腐蚀环境下进行实际试验有方法,该方法较为直观,可

在不同时间下直接观察零件的腐蚀状况,并进行对比评价,但方法的试验时间较长。其中,盐雾法是针对海水和海洋大气环境下零件耐腐蚀的评价方法,可分为常规盐雾试验法、加速盐雾试验和高温盐雾试验。

电化学腐蚀电流法和交流阻抗法是通过模拟腐蚀环境下零件的电化特性来评价零件耐腐蚀性能的方法。该方法的特点是可以给出零件的腐蚀电位、腐蚀电流和交流阻抗,从而评价零件腐蚀的倾向性和腐蚀速率,而且试验时间短,常用于零件修复涂层选择的耐腐蚀试验和腐蚀机理的研究。

图 13 是 Ni 基高温合金大气等离子喷涂 Ni-CrAl 涂层的高温氧化动力学测试实例^[11]。见盐雾腐蚀前后的 NiCrAl 涂层在 1 000 ℃氧化时,随腐蚀时间延长(5 h 后),涂层氧化速率降低,且盐雾腐蚀后 NiCrAl 涂层的氧化速率更快。

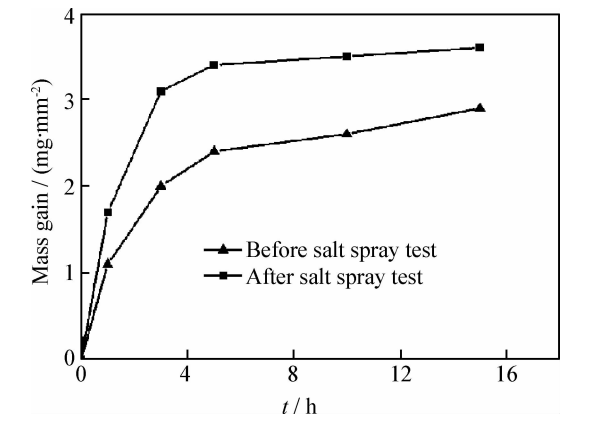


图 13 盐雾腐蚀前后 NiCrAl 涂层在 1 000 ℃氧化的动力学曲线^[11]

Fig. 13 Oxidation kinetics curves of NiCrAl coatings before and after the salt spray test at 1 000 ℃^[11]

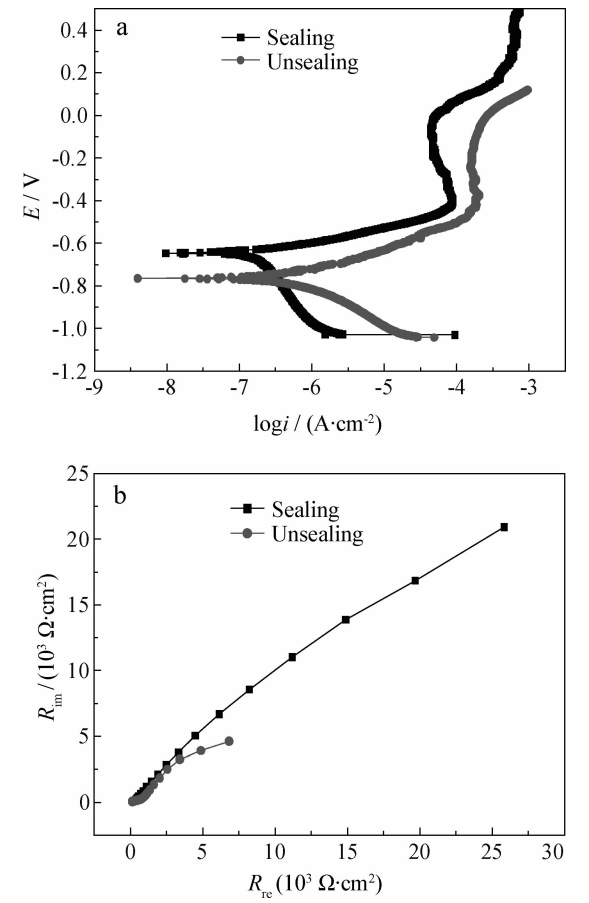
表 5 是直流(12V)电刷镀 CNT/Ni 镀层的腐蚀电位和腐蚀电流密度测试的实例。可以看出,在镀液中加入 1~3 g/L 的碳纳米管(CNT)后,镀层的腐蚀电位得到提升,腐蚀电流密度下降了 1 个数量级。

图 14 是超音速等离子喷涂 Al₂O₃-13%wt-TiO₂ 陶瓷涂层在 5%NaCl 水溶液极化曲线和交流阻抗图测试实例^[12],从图 14(a)可以看出,陶瓷涂层经封孔处理后的腐蚀电位明显提高,即腐蚀的倾向性下降。从图 14(b)可以看出,陶瓷涂层经封孔处理后的交流阻抗明显提高,即腐蚀的速度会明显下降。

表 5 镀层的腐蚀电位和腐蚀电流密度

Table 5 Corrosion potential and corrosion current density of coatings

Coatings	Corrosion potential /V	Corrosion current density/($\mu\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$)
Ni	-0.772	34.19
CNT/Ni (1 g/L)	-0.47	3.43
CNT/Ni (2 g/L)	-0.428	1.42
CNT/Ni (3 g/L)	-0.448	2.09



(a)Polarization curve (b)AC impedance chart

图 14 Al₂O₃-13% TiO₂ 陶瓷涂层的极化曲线和交流阻抗图^[12]

Fig. 14 Polarization curve and AC impedance chart of Al₂O₃-13% TiO₂ ceramic coating^[12]

6 结 语

(1)机械零件修复与再制造的表面质量分析与检测,是评价其质量的重要内容之一。对于尺寸恢复维修与再制造的零件,其表面质量的分析

与检测尤为重要。

(2)在表面修复的设计试验时,通常要对表面涂层的成分结构及组织形貌进行分析,从而实现零件表面性能的恢复与提升。

(3)根据零件的工作环境和失效形式,还应对修复与再制造零件(或样品)进行相应的性能检测,对磨损和腐蚀环境下工作零件应分别进行耐磨性和耐腐蚀性评价,以确保修复与再制造零件的性能达到或超过新品。

参考文献

[1] 蔡志海. 坦克发动机活塞环 CrN 基复合涂层的摩擦学性能与抗高温腐蚀行为研究 [D]. 装甲兵工程学院, 2010.

[2] 钱耀川. PEMFC 金属双极板材料电沉积改性技术研究 [D]. 装甲兵工程学院, 2010.

[3] 崔崇, 叶福兴, 魏海宏. 等离子喷涂工艺对 Fe 基非晶合金涂层微观组织结构的影响 [J]. 热喷涂技术, 2010, 2(4): 14-18.

[4] 残余应力仪 [J/OL]. <http://surface.nimte.ac.cn/facilities/detail.aspx?id=19>. 2013-09-20.

[5] 黄炳炎, 李午申, 邸新杰, 等. 焊接裂纹应力与磁记忆信号

关系的实验研究 [J]. 电焊机, 2006, 36(11): 35-55.

[6] 任维彬, 董世运, 徐滨士, 等. Fe314 合金激光熔覆层的应力分布规律 [J]. 中国表面工程, 2013, 26(3): 58-63.

[7] 孙丽丽, 代伟, 张栋, 等. Cr 掺杂及 Cr 过渡层对类金刚石薄膜附着力的影响 [J]. 中国表面工程, 2010, 23(4): 26-28.

[8] 董丽虹, 徐滨士, 董世运, 等. 金属磁记忆技术用于再制造毛坯寿命评估初探 [J]. 中国表面工程, 2010, 23(2): 106-111.

[9] 徐滨士, 朱绍华. 表面工程的理论与技术 [M]. 第 2 版. 北京: 国防工业出版社, 2010: 133.

[10] Jiang H, Browning R, Whitcomb J D, et al. Mechanical modeling of scratch behavior of polymeric coatings on hard and soft substrates [J]. Tribology Letters, 2010, 37(2): 159-167.

[11] 李寺, 马彬, 赵九蓬, 等. 盐雾条件下 NiCrAl 涂层的耐腐蚀性研究 [J]. 稀有金属材料与工程, 2010, 39(12): 2181-4.

[12] 范文超. 超音速等离子喷涂 Al₂O₃-13%wtTiO₂ 涂层制备及其防腐性能研究 [D]. 北京: 装甲兵工程学院, 2011.

作者地址: 北京市丰台区杜家坎 21 号 100072
装甲兵工程学院再制造技术重点实验室
Tel: (010) 6671 7019
E-mail: tanjuncn@sina.com

• 本刊理事单位介绍 •

上海出入境检验检疫局工业品与原材料检测技术中心

上海出入境检验检疫局工业品与原材料检测技术中心(简称“原材料中心”)由原上海进出口商品检验局化矿金、纺织和纸包等实验室组成,经事业单位法人登记,能独立承担第三方公正检验,对外开展业务活动。2002 年 8 月原材料中心获得认监委及中国合格评定国家认可委二合一认可,2009 年获中国质量认证中心质量管理体系认证证书。

原材料中心内设 2 个中心和 12 个科室,接受上海检验检疫局的委托,承担进出口石油及石化产品、有机化学品、无机化学品、矿产品、金属材料及其制品、工程材料、纺织材料、纺织品、轻工产品、食品接触材料、一次性卫生用品、纸张纸浆、包装等的实验室检测和检验工作,承担危险品分类鉴定与评估工作,以及与上述检测、检验、鉴定和评估相关的其他技术工作。与此同时,中心提供有关商品的检验服务及相关的技术咨询服务,并承担国家质量监督检验检疫总局指定的有关复验和仲裁检验任务。

2011 年度原材料中心积极开展科研工作,加强对涉及安全卫生环保和健康等商品和项目技术开发研究,完成各类科研项目 14 项,其中国家局项目 2 项,上海局课题 12 项。完成各类标准制订 28 项,其中国家标准 2 项,SN 标准 14 项,SHCIQ 标准 12 项;发表各类技术论文 79 篇,其中 SCI/EI 期刊论文 13 篇,中文核心期刊有 29 篇,ISTP 会议论文 1 篇,其他论文 36 篇。