

3种表面技术在轴磨损修复中的应用研究综述

刘晓明¹, 高云鹏¹, 闫侯霞², 赵晓春¹, 孙增伟¹

(1. 内蒙古电力科学研究院, 呼和浩特 010020;

2. 内蒙古能源发电投资集团有限公司金山热电厂, 呼和浩特 010106)

摘要: 轴是支承传动零件和传递运动及动力的重要部件,其主要失效形式是磨损失效。为了给磨损失效的轴选择恰当的修复方法并在对应的修复工艺条件下实施,从而保证轴修复质量、提高轴修复效率,对电弧喷涂、电刷镀、电火花沉积3种技术手段从理论和实际应用两方面进行了对比研究。结果表明,3种表面技术配合相应的工艺参数,能够实现轴的磨损修复。当轴的磨损状态为均匀磨损且磨损量在一定范围内(一般是2 mm以内)且有条件进行磨削加工时,建议采用以机械结合为主的电弧喷涂修复方式;当轴的磨损状态为均匀磨损且磨损量很小(一般是0.5 mm以内)且不具备磨削加工条件时,建议采用机械结合加范德华力结合的电刷镀修复方式;当轴的磨损状态为沟槽磨损或其他形式且有条件实施后续加工时,建议选择结合方式为冶金结合的电火花沉积修复方式。

关键词: 表面技术; 电弧喷涂; 电刷镀; 电火花沉积; 轴; 磨损; 修复

中图分类号: TG174.44; TQ153

文献标识码: A

文章编号: 1001-3660(2015)08-0103-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.08.019

Application Research Review on Three Kinds of Surface Technology in Repairing of Worn-out Axles

LIU Xiao-ming¹, GAO Yun-peng¹, YAN Hou-xia², ZHAO Xiao-chun¹, SUN Zeng-wei¹

(1. Inner Mongolia Electric Power Science and Research Institute, Hohhot 010020, China;

2. Jinshan Thermal Power Plant of Inner Mongolia Energy Power Investment Ltd, Hohhot 010106, China)

ABSTRACT: Axle is an important part of transmission supporting parts, which transfers movement and power. Its main failure mode is wear. In order to choose a proper repairing method for axles with worn-out failure and implement under corresponding repairing technology condition, to ensure the repairing quality and improve the repairing efficiency, comparative study was conducted on three kinds of surface technology methods including electric arc spraying, electric brush plating and electric spark deposition from the aspects of theory and practical application. The results showed that all three methods could repair the worn-out axle under proper technology parameters. When the wear status of axle was well distributed wear and the wearing capacity was within a certain range (usually limited to 2 mm), electric arc spraying with mechanic combination was chosen to repair the failure axle. When the

收稿日期: 2015-04-29; 修订日期: 2015-05-20

Received: 2015-04-29; Revised: 2015-05-20

基金项目: 内蒙古电力(集团)有限责任公司2014年第1批科技项目(201401032)

Fund: Supported by 2014 First Batch of Science and Technology Project of Inner Mongolia Electric (Group) Co., Ltd (No.201401032)

作者简介: 刘晓明(1978—),男,内蒙人,博士,高级工程师,主要从事电力系统微/纳米涂层材料研发、涂层制备及应用研究。

Biography: LIU Xiao-ming (1978—), Male, from Inner Mongolia, Ph. D., Senior engineer, Research focus: development of micro/nano coating material for electric power system, coating preparation and application study.

wear status of axle was well distributed wear and the wearing capacity was small (usually limited to 0.5 mm), electric brush plating with mechanic combination and Waals forces combination was chosen to repair the failure axle. When the wear status of axle was groove or other forms, electric spark deposition with metallurgy combination was chosen to repair the failed axle.

KEY WORDS: surface technology; electric arc spraying; electric brush plating; electric spark deposition; axle; wear; repair

轴是电站重要且使用较多的零件,主要作用是支承传动零件和传递运动及动力。轴在使用过程中,因逐渐磨损而使尺寸超出公差范围或局部划伤造成密封不严,从而导致失效。运用表面技术对轴磨损实施修复,具有非常大的实际意义。在针对轴实施修复的方法中,电弧喷涂、电刷镀、电火花沉积3种表面技术应用非常广泛。

近年来,研究人员在电弧喷涂、电刷镀或电火花沉积修复轴方面做了许多研究,取得了非常大的进展。在电弧喷涂修复轴方面,采用电弧喷涂方法在轴表面制备了结构均匀、致密的Fe基、Ni基非晶微(纳)米涂层;涂层组织包含固溶体、非晶金属间化合物、微(纳)米晶,结合强度高、耐磨性好,轴转角和台阶处性能大大提高。引入计算机模拟等先进分析手段,提高了电弧喷涂的应力分析、温度分析精准水平,提高了电弧喷涂修复轴的效率和效果^[1-11]。采用电刷镀方法在轴表面制备了包含Ni元素的微(纳)米电刷镀镀层,电刷镀镀层表面平整、致密,工艺控制得当不会出现麻点、气孔等缺陷,镀层基本呈现面心立方结构,当择优取向为(111)面时,镀层的耐磨性能较好;普通碳钢、不锈钢均可以实现刷镀修复。通过电刷镀技术成功解决了发电机大轴轴颈配合面以及齿轮轴轴颈磨损问题^[12-19]。采用电火花沉积技术在轴表面制备包含Fe、Cr、Ni元素在内的沉积层,基材包括45钢、40Cr以及H13钢在内的多种材料。沉积层与基材间呈冶金结合,沉积层中弥散分布的硬质相提高了抗磨损性能,优化工艺参数可使得沉积层的品质更高,通过电火花沉积同样实现了轴的磨损修复^[20-32]。

在工程应用过程中,如何针对轴的磨损情况,选择恰当的修复技术,采用正确的工艺参数成功对轴实施修复,是研究人员常见的技术问题。因此,本文对3种表面技术进行对比研究,结合实际修复案例对工艺进行阐述。

1 3种表面技术修复轴对比分析

电弧喷涂、电刷镀、电火花沉积所用修复材料非常多,类型更是多种多样,所获得组织也差别很大。

结合利用3种表面技术修复轴的修复案例,对含Ni、Cr、Fe等3种元素的修复材料进行对比研究。

1.1 电弧喷涂

电弧喷涂依靠电弧热将丝材熔化,用高压气体将熔融的金属熔滴雾化,并高速喷射到基材表面形成涂层。电弧喷涂材料是两根能够导电的金属丝或非金属丝,由送丝机连续、均匀地送进电弧喷枪的两个互成一定夹角的导电嘴内,导电嘴分别与喷涂电源的正负极相连并彼此绝缘。喷涂时,喷涂丝材由送丝机送进,经导电嘴在前方一定距离接触,产生电弧热将丝材端部熔化;同时,电弧喷枪中心处通过的高压空气将溶化后的金属雾化,并以非常高的速度喷射到基材表面,冷却凝固后形成电弧喷涂涂层^[33-37]。

采用DZ400的高速电弧喷涂系统对轴表面实施修复,电压为30~32 V,电流为175~180 A,空气压力为0.43~0.45 MPa,距离为280~300 mm,喷涂材料为含Fe、Cr、Ni元素的合金丝,喷涂后的涂层截面的金相组织见图1。从图1中可以看出,电弧喷涂涂层与基体之间主要是机械结合。涂层具有典型的层状结构,从涂层截面中不仅可以看出孔隙、未熔化的颗粒、层与层之间的界面裂纹,也可以看到在涂层表面存在一些细小的层裂。扁平颗粒间结合较好,扁平层与层之间存在薄的氧化物层。涂层的孔隙具有储油作用,有助于轴修复后的润滑^[38-40]。

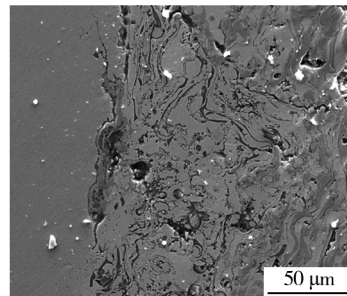


图1 电弧喷涂涂层截面组织

Fig.1 Cross-sectional structure of coating prepared by electric arc spraying

某电厂磨煤机拉杆轴,轴均匀磨损减薄1.2 mm,采用电弧喷涂方法进行修复。修复前,采用机加工的

方法去掉表面厚度约 0.2 mm 的疲劳层,采用喷砂的方法进行处理。选用粒度为 250 μm 的棕刚玉砂粒,与轴的修复表面呈 45° 角度,距离为 200 mm,空气压力为 0.4 MPa,进行表面喷砂处理。完全去除氧化皮、锈、污垢等附着物后,进行表面粗糙化处理,使表面粗糙度达到 80 ~ 120 μm 。在喷涂过程中,采用一字型往复喷涂方式,喷涂参数严格按照推荐工艺,保证涂层厚度均匀,防止出现漏喷现象。经电弧喷涂修复后的轴如图 2 所示,涂层厚度为 1.8 mm。



图2 电弧喷涂修复后的轴

Fig. 2 Axle repaired by electric arc spraying

1.2 电刷镀

电刷镀依据电化学沉积原理,在能够导电基材表面的特定位置,以较快的速度沉积一定厚度的涂层^[41-46]。电源的负极通过电缆线与刷镀工件连接,正极通过电缆线与镀笔阳极连接,阳极经包裹后与工件的刷镀表面轻轻接触,使得含有需沉积金属离子的镀液不断地添加到阳极和工件表面之间。在充满镀液的阳极和工件表面之间形成了一个“微型电镀槽”,在工件和阳极之间电场力的作用下,带正电荷的金属离子向带负电荷的基材表面实施定向迁移;同时,在基材表面金属离子获得电子被还原造成金属原子,金属原子在基材表面按一定的规律沉积形成镀层,镀层被“刷”在工件表面上,随着时间的推移,镀层厚度不断增加,直至所需厚度时止。

采用 TDN-200, TDN-300 型电刷镀电源对轴表面实施修复。工艺参数:1) 刷镀电净液时,电压为 10 ~ 12 V,时间为 8 s,正极性;2) 刷镀 1 号活化液时,电压为 12 ~ 15 V,时间为 3 s,反极性;3) 刷镀 2 号活化液时,电压为 18 ~ 20 V,时间为 50 s,反极性;4) 刷镀特殊镍溶液时,电压为 15 ~ 18 V,时间为 60 s,正极性;5) 刷镀高浓度镍溶液时,电压为 12 ~ 15 V,时间为 7200 s,正极性。

镀层的截面金相组织如图 3 所示,可以看出镀层与基体之间以机械结合,部分以范德华力相结合;刷镀层呈白亮色,沿刷镀层生产的方向比较致密,垂直

于镀层生长方向的黑色部分为镀层与镀层之间经强腐蚀剂腐蚀后的界面,平行于镀层生长方向的黑色部分为孔洞。这些孔洞具有储油作用,当运用该技术修复轴类配合面时,这些孔洞储存的润滑油对配合面的润滑将起到有益作用^[47]。经电刷镀修复后的轴如图 4 所示。

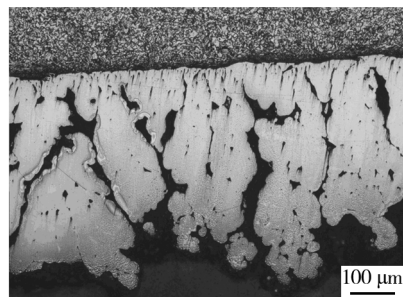


图3 电刷镀镀层截面组织

Fig. 3 Cross-sectional structure of coating prepared by electric brush plating

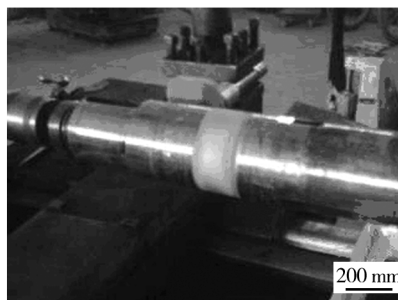


图4 电刷镀修复后的轴

Fig. 4 Axle repaired by electric brush plating

某电厂传动轴,轴配合面经磨损外径减薄 0.96 mm。电刷镀修复之前,对轴的配合面进行表面准备:用油污清洗剂和丙酮等化学试剂去除轴配合面上的油污和油脂,用锉刀或砂纸等方式去除轴配合面上的氧化皮、铁锈,对配合面上的划伤、擦伤、凹坑进行处理;如果配合面上有油孔、键槽,除对表面进行彻底清洗外,还需进行填塞处理,使配合面能够形成一个连续的表面保证刷镀的顺利进行。轴配合面表面准备工作结束后,通过电净、活化、刷过渡层、刷镀层完成整个电刷镀修复。轴的原始尺寸为 $\phi 58.84$ mm,经过刷镀后尺寸为 $\phi 59.80$ mm,镀层厚度为 0.48 mm。

1.3 电火花沉积

电火花沉积是将需要沉积的材料做成电极,利用电极在基材表面旋转,电源在电极与基材相接触的很

小的区域内瞬间($10^{-6} \sim 10^{-5}$ s)通过高密度电流($10^5 \sim 10^6$ A/cm²),在很小的范围内产生 5000 ~ 25 000 K 的高温,使放电区域内的材料高能离子化,电极高速转移到基材表面,并扩散到基材表层,从而形成具有冶金结合的沉积层^[48-51]。

采用 DZ-4000(Ⅲ)多功能表面强化机对轴表面实施修复,电压为 120 V,电流为 6 A,频率为 46 Hz。堆焊层的金相组织如图 5 所示,照片中下方白亮色为含有 Fe, Cr, Ni 元素的沉积层。电火花沉积所获得的沉积层组织相对均匀致密,基本没有喷涂层的孔洞和刷镀层的裂纹等缺陷,合金元素在沉积层和基材之间是均匀过渡的。过渡层呈黑色,主要原因是在电火花沉积的高温高能状态下,细小的马氏体表面析出细小的碳化物,经过金相腐蚀液体腐蚀后变黑。整体上看,沉积层与母材在电火花放电能量下熔化发生了冶金反应,沉积层与母材以冶金结合方式进行^[52]。

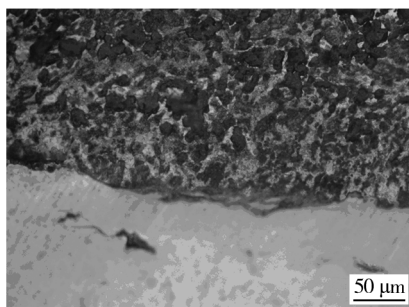


图 5 电火花沉积堆焊层截面组织

Fig. 5 Cross-sectional structure of coating prepared by electric spark deposition

某电厂风机主轴,运行过程中磨损出沟槽。修复轴之前,将缺陷打磨处理至宽 10 mm,深 2 mm,长度约为整个轴外圆的 1/4;然后对轴的表面进行检查,去除影响电火花沉积效果的油污、氧化皮、油脂后,用砂纸轻轻打磨轴的表面直至露出金属光泽。调整电火花沉积设备的相关参数保证电源的输出功率、输出频率和氩气流量。电极均匀地在轴缺陷表面移动,形成致密均匀的堆焊层。电极与轴的表面之间不宜按压太紧,防止电极与轴表面直接短路产生不了火花。电极与轴表面的夹角以 $30^\circ \sim 40^\circ$ 为宜,电极左右摆动的摆幅以 10 ~ 40 mm 为宜。在电火花沉积的过程中应时刻观察修复后轴的表面的情况,出现凹坑应及时进行补充沉积;如果出现比较尖锐的高点,应及时用锉刀或锤击的方式进行消除。经电火花沉积修复后的轴如图 6 所示,表面经过打磨、研磨处理后交付厂家使用。

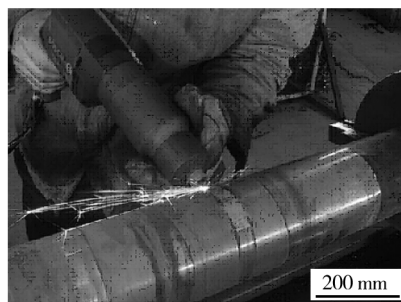


图 6 电火花沉积修复后的轴

Fig. 6 Axle repaired by electric spark deposition

1.4 对比分析

比较 3 种表面工程技术,在修复轴磨损时表现出不同的特点:电弧喷涂工艺具有涂层制备效率高、能耗低、可以获得“伪合金”涂层的优点;电刷镀工艺具有材料利用率高、刷镀层厚度均匀、作业环境较好的优点;电火花沉积工艺具有修复磨损的类型多、结合强度高、设备移动性好的优点。

同时,3 种表面技术在修复轴时又分别有各自的局限,电弧喷涂涂层与轴之间是机械结合为主,当涂层厚度超过一定范围(一般是 2 mm 以上),在强烈震动或冲击的作用下可能会造成涂层的脱落;涂层表面修复后需要磨削加工,磨削耐磨涂层的工作量较大,不太适合沟槽修复。刷镀层与轴之间是机械结合加范德华力结合,当涂层的厚度超过一定范围时,刷镀层的厚度增加缓慢,轴修复刷镀层不能超过一定范围(一般是 0.5 mm 以下),不太适合沟槽修复。电火花沉积效率较低,不适合轴的大面积均匀磨损,堆焊层同样需要后续加工,增加了工艺的复杂性。

2 结论

1) 运用电弧喷涂、电刷镀、电火花沉积 3 种表面技术,配合相应的工艺参数,成功实施了轴在不同磨损方式下的修复。

2) 电弧喷涂涂层组织成层片状,层片与轴的中线平行,涂层与轴之间是冶金结合;电刷镀镀层组织沿垂直轴的中线生长,镀层与轴之间是冶金结合加范德华力结合;电火花沉积的焊接材料与轴进行了冶金反应,组织均匀致密,堆焊层与轴之间是冶金结合。

3) 当轴为均匀磨损,磨损量较小(一般是 0.5 mm 以下)且不具备后续磨削加工条件时,建议选用电刷镀修复方式。当轴为均匀磨损,磨损量在一定范围内(一般是 2 mm 以内)且有条件进行磨削加工时

建议采用电弧喷涂修复方式。当轴划伤为沟槽或其他局部磨损形式,建议采用电火花沉积修复方式。

参考文献

- [1] 田浩亮,魏世丞,陈永雄,等. 高速电弧喷涂再制造曲轴质量和效率优化研究[J]. 材料科学与工艺,2013,23(2):1—5.
TIAN Hao-liang, WEI Shi-cheng, CHEN Yong-xiong, et al. Quality and Efficiency Optimization of High Speed Arc Spraying Remanufacturing Crankshaft[J]. Materials Science and Technology, 2013, 23(2):1—5.
- [2] 张国庆,李广伟,王成焘,等. 电弧喷涂修复曲轴多轴疲劳寿命计算[J]. 兵工学报,2013,34(3):324—331.
ZHANG Guo-qing, LI Guang-wei, WANG Cheng-tao, et al. Fatigue Life Prediction of Crankshaft Repaired by Arc Spraying[J]. Acta Armamentarii, 2013, 34(3):324—331.
- [3] 商俊超,梁秀兵,郭永明,等. 高速电弧喷涂镍基非晶纳米晶复合涂层及其磨损性能研究[J]. 装甲兵工程学院学报,2013,27(2):84—87.
SHANG Jun-chao, LIANG Xiu-bing, GUO Yong-ming. High Velocity Arc Spraying Ni-based Amorphous Nanocrystalline Composite Coating and Its Wear Properties[J]. Journal of Academy of Armored Force Engineering, 2013, 27(2):84—87.
- [4] 陈彬,刘阁,张贤明,等. HVAS 涂层力学性能的 T-S 模糊辨识[J]. 计算力学学报,2012,29(3):458—463.
CHEN Bin, LIU Ge, ZHANG Xian-ming, et al. Identification of Mechanical Property of HVAS Coating based on T-S Fuzzy Model[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2012, 29(3):458—463.
- [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.
LIANG Xiu-bing, CHEN Yong-xiong, BAI Jin-yuan, et al. An Automatic High Velocity Arc Spraying Technology Applied to Remanufacture Engine Crankshaft[J]. China Surface Engineering, 2010, 23(2):112—116.
- [6] 吴比,李增荣. 电弧喷涂铁基缸体涂层材料组织及耐磨性分析[J]. 石油化工高等学校学报,2011,24(5):86—90.
WU Bi, LI Zeng-rong. Analysis on Microstructure and Wear Resistance of Iron-based Coatings Deposited by Arc Spraying for Cylinder Blocks[J]. Journal of Petrochemical Universities, 2011, 24(5):86—90.
- [7] 陈永雄,胡尧强,梁秀兵,等. FeCrBSiNb 粉芯丝材电弧喷涂的弧区动态行为[J]. 中国表面工程,2015,28(1):15—20.
CHEN Yong-xiong, HU Yao-qiang, LIANG Xiu-bin, et al. Arc Dynamic Behavior of FeCrBSiNb Electro-Arc Spraying Cored Wire[J]. China Surface Engineering, 2015, 28(1):15—20.
- [8] 张欣,王泽华,林尽染,等. 高速电弧喷涂 FeCrBSiMo 涂层抗高温氧化性能[J]. 焊接学报,2014,35(12):19—22.
ZHANG Xin, WANG Ze-hua, LIN Jin-ran, et al. Elevated Temperature Oxidation Resistance of FeCrBSiMo Coating by High Velocity Arc Spraying[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(12):19—22.
- [9] 张卫涛,周勇,李太江,等. 超音速电弧喷涂 NiTi 混合涂层的冲蚀磨损性能研究[J]. 热加工工艺,2015,44(2):142—149.
ZHANG Wei-tao, ZHOU Yong, LI Tai-jiang, et al. Research on Erosion Wear Resistance of NiTi Mixture Coating of High Velocity Arc Spraying[J]. Hot Working Technology, 2015, 44(2):142—149.
- [10] 娄建新,刘丹,张旋,等. 热喷涂 FeCrBSiNbW 涂层结构演变及空蚀性能[J]. 中国表面工程,2014,27(5):74—79.
LOU Jian-xin, LIU Dan, ZHANG Xuan, et al. Microstructure Evolution and Cavitation Erosion of the FeCrBSiNbW Coatings Prepared by Arc Spraying Process[J]. China Surface Engineering, 2014, 27(5):74—79.
- [11] 王照锋. 高速电弧喷涂 FeCrNi/Ni 包金刚石复合层的组织与性能[J]. 材料保护,2014,47(9):8—10.
WANG Zhao-feng. Microstructure and Properties of FeCrNi/Ni Coated Diamond Composite Layer of High Velocity Arc Spraying[J]. Materials Protection, 2014, 47(9):8—10.
- [12] 张书,刘锦云,王坤,等. 06Cr19Ni10 不锈钢电刷镀前处理工艺的优化[J]. 中国表面工程,2015,28(1):76—82.
ZHANG Shu, LIU Jin-yun, WANG Kun, et al. Optimization of Pretreatment of Brush Electro-plating on 06Cr19Ni10 Stainless Steel[J]. China Surface Engineering, 2015, 28(1):76—82.
- [13] 姜海,杜锋,李晶,等. 电刷镀纳米镍镀层制备及其形成机理分析[J]. 电镀与精饰,2014,36(11):11—14.
JIANG Hai, DU Feng, LI Jing, et al. Fabrication and Formation Mechanism of Nanocrystalline Nickel Coating Plated by Brush Electroplating[J]. Plating & Finishing, 2014, 36(11):11—14.
- [14] 李晓强,谭立锋,苏东,等. 土耳其 600MW 超临界机组发电机轴颈磨损原因分析及处理[J]. 东北电力技术,2012,33(4):37—42.
LI Xiao-qiang, TAN Li-feng, SU Dong, et al. Journal Wearing Analysis and Approach on Turkish 600 MW Supercritical Unit[J]. Northeast Electric Power Technology, 2012, 33(4):37—42.
- [15] 侯键. 浅谈汽轮发电机转子轴颈磨损的修复[J]. 科技创

- 新与应用,2011(21):54—59.
- HOU Jian. Discussion on Repair of Rotor Shaft Neck Wear Technology Innovation And Application[J]. Technology Innovation and Application,2011(21):54—59.
- [16] 朱晓刚,杜锋,孔德新,等. 电刷镀技术的发展与应用[J]. 山东工业技术,2014(12):24—27.
- ZHU Xiao-gang, DU Feng, KONG De-xin, et al. Development and Application of Eletro-brush Plating[J]. Shandong Industrial Technology,2014(12):24—27.
- [17] 凌文丹,赵平堂,李志攀,等. Ni/纳米 Y_2O_3 复合刷镀层的组织结构与摩擦磨损特性[J]. 材料保护,2014,47(7):12—15.
- LING Wen-dan, ZHAO Ping-tang, LI Zhi-pan, et al. Microstructure and Friction-wear Characteristics of Electro-brush Plating Ni based Nano Y_2O_3 Composite Coating[J]. Materials Protection,2014,47(7):12—15.
- [18] 张玉峰. 一种电刷镀铁修复齿轮轴的工艺研究[J]. 电镀与精饰,2014,36(8):26—29.
- ZHANG Yu-feng. Research on a Kind of Fe Brush Plating Technology for Gear Shaft Repairing[J]. Plating & Finishing,2014,36(8):26—29.
- [19] 李春雨. 40Cr 的电刷镀工艺参数实验研究[J]. 重庆科技学院学报:自然科学版,2013(1):148—151.
- LI Chun-yu. Experiments Study on Technological Parameter of Brush Plating Nickel of 40Cr[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology(Natural Sciences Edition),2013(1):148—151.
- [20] 孙凯伟,张琪娜,涂益民,等. 电火花沉积技术国内外研究的最新进展[J]. 焊接技术,2014,43(8):1—5.
- SUN Kai-wei, ZHANG Qi-na, TU Yi-min, et al. Latest Development in Research of Electro-spark Deposition Surface Technology[J]. Welding Technology,2014,43(8):1—5.
- [21] 周永权,周朝霞,姜涛,等. 镍基合金 Deloro60 电火花沉积层摩擦学性能研究[J]. 矿山机械,2015(2):125—129.
- ZHOU Yong-quan, ZHOU zhao-xia, JIANG Tao, et al. Tribological Properties Researched of Electric Spark Deposition Layer on Nickel Base Alloy Deloro60[J]. Mining & Processing Equipment,2015(2):125—129.
- [22] 高根震,潘仁,肖永杰. 45 钢表面电火花沉积 Deloro 50 工艺参数研究[J]. 铸造,2013,62(8):729—732.
- GAO Gen-zhen, PAN Ren, XIAO Yong-jie. Process Parameters Research of the Surface of 45 Steel Deposited Deloro 50[J]. China Foundry,2013,62(8):729—732.
- [23] 陈龙,孟惠民,黄亮亮,等. 45 钢表面电火花沉积多层 YG8 涂层的组织和耐磨性[J]. 材料热处理学报,2013,34(11):170—175.
- CHEN Long, MENG Hui-min, HUANG Liang-liang, et al. Microstructure and Wear Property of Multi-layer YG8 ESD Coating on 45 Steel[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment,2013,34(11):170—175.
- [24] 王要利,于华,石红信,等. 40Cr 钢表面电火花沉积 WC 的界面行为[J]. 材料热处理学报,2013,34(8):173—176.
- WANG Yao-li, YU Hua, SHI Hong-xin, et al. Interface Behavior of WC Coatings on 40Cr Steel by Electro-spark Deposition[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment,2013,34(8):173—176.
- [25] 董晨竹,刑斌赛,郝杰,等. 电火花沉积 Fe 基涂层的组织及耐磨性能[J]. 表面技术,2013,42(2):37—39.
- DONG Chen-zhu, XING Bin-sai, HAO Jie, et al. Microstructure and Wear Properties of Fe-based Coating Prepared by Electro-spark Deposition[J]. Surface Technology,2013,42(2):37—39.
- [26] 高玉新,赵程,易剑,等. 电火花沉积 Ni-Cr 合金涂层的组织及性能[J]. 材料工程,2012(3):74—78.
- GAO Yu-xin, ZHAO Cheng, YI Jian, et al. Microstructure and Properties of Ni-Cr Alloyed Coating Prepared by Electrosark Deposition Processes[J]. Journal of Materials Engineering,2012(3):74—78.
- [27] 王建升,程锐,张瑞珠,等. 轧辊表面电火花沉积涂层的耐磨性[J]. 材料热处理学报,2012,33(9):112—116.
- WANG Jian-sheng, CHEN Rui, ZHANG Rui-zhu, et al. Wear Resistance Property of the Electric Spark Deposition Coating on Roller Surface[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment,2012,33(9):112—116.
- [28] 聂英石,李文,李登科,等. 电火花沉积 Fe48Cr16Mo15-C17B4 非晶合金涂层的微观组织和性能[J]. 材料研究学报,2013,27(1):75—79.
- NIE Ying-shi, LI Wen, LI Deng-ke, et al. Microstructure and Properties of Electric spark Deposition Fe48Cr16Mo15C17B4 Amorphous Alloy Coating[J]. Chinese Journal of Materials Research,2013,27(1):75—79.
- [29] 葛志宏,邓静. H13 钢表面电火花强化层的组织与性能[J]. 铸造技术,2013,34(6):709—710.
- GE Zhi-hong, DENG Jing. Microstructure and Properties of H13 Steel Surface Strengthened by Electrosark Processing[J]. Foundry Technology,2013,34(6):709—710.
- [30] 张留伟,王春杰,周小平,等. H13 钢表面电火花沉积司太立合金的组织结构[J]. 热加工工艺,2013,42(18):122—123.
- ZHANG Liu-wei, WANG Chun-jie, ZHOU Xiao-ping, et al. Microstructure of Stellite Alloy by Electro-spark Deposition on Surface of H13 Steel[J]. Hot Working Technology,2013,42(18):122—123.
- [31] 葛志宏,邓静. H13 钢表面电火花沉积层摩擦磨损特性[J]. 热加工工艺,2013,42(18):130—131.
- GE Zhi-hong, DENG Jing. Tribological Behaviors of Coating

- on H13 Steel Surface by Electro-spark Deposition[J]. Hot Working Technology, 2013, 42(18):130—131.
- [32] 葛志宏,邓静. H13 钢模具表面电火花沉积修复层耐磨性和抗腐蚀性[J]. 热加工工艺, 2013, 42(21):112—113.
- GE Zhi-hong, DENG Jing. Wear Resistance and Hot Corrosion Resistance of H13 Steel Surface by Electro-spark Deposition[J]. Hot Working Technology, 2013, 42(21):112—113.
- [33] 徐滨士,朱绍华. 表面工程的理论与技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2010.
- XU Bing-shi, ZHU Shao-hua. Surface Engineering Theory and Technology[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2010.
- [34] 刘晓明,董俊慧,徐润生,等. 高速火焰喷涂 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层抗高温腐蚀性能研究[J]. 表面技术, 2010(3):34—36, 108.
- LIU Xiao-ming, DONG Jun-hui, XU Run-sheng, et al. High-temperature Corrosion Resistance Research of HVFS Fe-Al/Cr₃C₂ Composite Coating[J]. Surface Technology, 2010(3):34—36.
- [35] 黄钰,程西云,彭美华. Zn-Al 伪合金涂层的耐蚀性能研究[J]. 表面技术, 2014, 43(1):35—39.
- HUANG Yu, CHENG Xi-yun, PENG Mei-hua. Corrosion Resistance of Pseudo Zn-Al Alloy Coating[J]. Surface Technology, 2010(3):34—36, 108.
- [36] 王刚,焦孟旺,李贺,等. 热喷涂新技术在发动机减摩性能方面的应用和研究[J]. 表面技术, 2014, 43(1):103—107.
- WANG Gang, JIAO Meng-wang, LI He, et al. Application and Research of New Thermal Spraying Technology in Engine Friction-reduction Performance[J]. Surface Technology, 2014, 43(1):103—107.
- [37] 邓宇,余圣甫,闫宁,等. V/Nb 对电弧喷涂马氏体不锈钢合金涂层组织和性能的影响[J]. 表面技术, 2013, 42(6):27—31.
- DENG Yu, YU Sheng-fu, YAN Ning, et al. Effects of V/Nb on Microstructure and Properties of Arc Sprayed Martensitic Stainless Steel Alloy Coatings[J]. Surface Technology, 2013, 42(6):27—31.
- [38] 刘晓明,董俊慧,徐润生,等. 含 NiCr 热喷涂涂层材料抗高温腐蚀性能对比研究[J]. 内蒙古电力技术, 2010(S2):33—35.
- LIU Xiao-ming, DONG Jun-hui, XU Run-sheng, et al. Comparison Research to High Temperature Corrosion Resistance Performance of Hot Spray Coating Containing NiCr Element[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2010(S2):33—35.
- [39] 高云鹏,刘晓明,赵晓春,等. 高速电弧喷涂 Fe-Al/Cr₃C₂RE 复合涂层抗高温腐蚀性能探讨[J]. 内蒙古电力技术, 2010(S2):36—43.
- GAO Yun-peng, LIU Xiao-ming, ZHAO Xiao-chun, et al. Discussion to High Temperature Corrosion Resistance Performance of Fe-Al/Cr₃C₂RE Composite Coating with High Speed Electric Arc Spraying[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2010(S2):36—43.
- [40] 刘晓明,董俊慧,徐润生. 不同温度下 Fe-Al/Cr₃C₂ 复合涂层的摩擦学特性研究[J]. 材料工程, 2011(4):80—83.
- LIU Xiao-ming, DONG Jun-hui, XU Run-sheng, et al. Study on Tribological Characteristics of Fe-Al/Cr₃C₂ Composite Coating at Different Temperatures[J]. Journal of Materials Engineering, 2011(4):80—83.
- [41] 朱胜,姚巨坤. 电刷镀再制造工艺技术[J]. 新技术新工艺, 2009(6):1—3.
- ZHU Sheng, YAO Ju-kun. Remanufacturing Process and Technologies of Electric Brush-plating[J]. New Technology & New Process, 2009(6):1—3.
- [42] 胡振峰,汪笑鹤,吕鏖,等. 自动化电刷镀技术在发动机缸体再制造中的应用[J]. 中国表面工程, 2012, 25(4):27—30.
- HU Zheng-feng, WANG Xiao-he, LYU Biao, et al. Automatic Brush Electroplating Technology Applied to Remanufacturing Cylinder Body of Engine[J]. China Surface Engineering, 2012, 25(4):27—30.
- [43] 李国禄,王海斗,徐滨士,等. 空间原子氧辐照对电刷镀 Ni/MoS₂-C 镀层组织结构及摩擦学性能的影响[J]. 材料工程, 2014(2):24—28.
- LI Guo-lu, WANG Hai-dou, XU Bin-shi, et al. Effects of Space Atomic Oxygen Irradiation on the Structure and Tribological Properties of Ni/MoS₂-C Coating by Electricity Brush Plating[J]. Journal of Materials Engineering, 2014(2):24—28.
- [44] 任艳萍,邓红华,黄方遒,等. 电刷镀在表面工程中应用的研究进展[J]. 表面技术, 2013, 42(6):83—91.
- REN Yan-ping, DENG Hong-hua, HUANG Fang-qiu, et al. Research Progress of Brush Plating Technology in Surface Engineering[J]. Surface Technology, 2013, 42(6):83—91.
- [45] 陈康,黄蕙. 工艺条件对镍基-Al₂O₃ 颗粒复合电刷镀层性能的影响[J]. 表面技术, 2011, 40(3):75—78.
- CHEN Kang, HUANG Hui. Research on Coatings Properties of Ni-Al₂O₃ Particle Composite Brush Plating under Different Process Conditions[J]. Surface Technology, 2011, 40(3):75—78.
- [46] 包春江,王瑞丽. 电刷镀表面预处理工艺研究[J]. 表面技术, 2010, 39(3):78—81.

- 响的研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2008, 20(2): 96—99.
- WANG Yin-xu, HU Fan, WANG Jia. Rusting Properties of Cold-rolled Steel Sheet and the Effect of Oxides[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2008, 20(2): 96—99.
- [14] 钟声. 冷轧薄板表面缺陷产生原因综述[J]. 四川冶金, 2007, 29(3): 23—27.
- ZHONG Sheng. Summary of Cause Analysis for the Surface Defects of Cold Rolled Sheet[J]. Sichuan Metallurgy, 2007, 29(3): 23—27.
- [15] 赵诚, 单芳. 不锈钢冷轧带钢表面光洁度的控制[J]. 2005, 25(3): 38—39.
- ZHAO Cheng, SHAN Fang. Control of Surface Degree of Finish of Cold Rolled Stainless Steel Strip[J]. 2005, 25(3): 38—39.

(上接第85页)

- [9] ZHANG F Y, CHEN H, HU Y K, et al. Influence of Mo Content on Microstructure and Microhardness of Laser Solid Formed Ti-6Al-Mo System Alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2013, 42(7): 1332—1336.
- [10] 高霁, 宋德阳, 冯俊文. 工艺参数对钛合金 CBN 涂层几何形貌的影响[J]. 表面技术, 2015, 44(1): 77—80.
- GAO Ji, SONG De-yang, FENG Jun-wen. Influence of Processing Parameters on Geometrical Features of CBN Coatings by Laser Cladding on Titanium Alloy Surface[J]. Surface Technology, 2015, 44(1): 77—80.
- [11] 项坤. 钛合金单道激光熔覆工艺的研究[J]. 表面技术, 2013, 42(1): 91—93, 104.
- XIANG Kun. Study on Titanium Alloy Single Laser Cladding Process[J]. Surface Technology, 2013, 42(1): 91—93, 104.
- [12] PAULO D. Predicting the Geometric Form of Clad Angle in Laser Cladding by Powder using Multiple Regression Analysis (MRA)[J]. Materials and Design, 2008, 29(2): 554—557.
- [13] LALAS C, TSIRBAS K, SALONITI S. An Analytical Model of the Laser Clad Geometry[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2007, 32(1): 34—41.
- [14] HEMMATI I, OCELIK V. The Effect of Cladding Speed on Phase Constitution and Properties of AISI 431 Stainless Steel Laser Deposited Coatings[J]. Surface & Coating Technology, 2011, 205(21/22): 5235—5239.
- [15] TANG Xiao-dan, YAO Jian-hua, KONG Fan-zhi. Manufacture and Microstructure Performance of H13-TiC Gradient Composite Coating Made by Laser Cladding[J]. Laser Technology, 2010, 34(3): 18—21.
- [16] 徐卫仙, 张群莉, 姚建华. 热锻模激光熔覆 Co 基 WC 涂层的高温磨损性能研究[J]. 应用激光, 2013, 33(4): 370—375.
- XU Wei-xian, ZHANG Qun-li, YAO Jian-hua. Research on High-temperature Wear Resistance of Laser Cladding Co-based WC Composite Coating on Hot-forging Die[J]. Applied Laser, 2013, 33(4): 370—375.

(上接第109页)

- BAO Chun-jiang, WANG Rui-li. Experimental Research on Surface Pretreatment Process in Electro-brush Plating[J]. Surface Technology, 2010, 39(3): 78—81.
- [47] 孙增伟, 赵晓春, 刘晓明, 等. 电刷镀在轴类修复中的应用[J]. 电镀与精饰, 2010, 32(7): 30—31.
- SUN Zeng-wei, ZHAO Xiao-chun, LIU Xiao-ming, et al. Application of Brush Plating in Shafts Repairing[J]. Plating & Finishing, 2010, 32(7): 30—31.
- [48] 孙凯伟, 于华, 吴公一, 等. TA2 表面电火花沉积 NiCr 涂层的界面行为[J]. 焊接技术, 2015, 44(4): 10—12.
- SUN Kai-wei, YU Hua, WU Gong-yi, et al. Interface Behavior of NiCr Coating on TA2 Alloy Produced by Electrospark Deposition[J]. Welding Technology, 2015, 44(4): 10—12.
- [49] 赵程, 高玉新. 电火花沉积 Ni 基涂层的质量过渡及电极损失[J]. 表面技术, 2012, 41(3): 51—53.
- ZHAO Chen, GAO Yu-xin. Mass Transfer Regularity and Mass Loss of Electrode of Electrospark Deposited Ni-based Coating[J]. Surface Technology, 2012, 41(3): 51—53.
- [50] 金君, 董晨竹, 徐东. 电火花沉积 Ni 基合金涂层的摩擦磨损特性[J]. 表面技术, 2011, 40(3): 32—34.
- JIN Jun, DONG Chen-zhu, XU Dong. Tribological Properties of Ni-based Coating Prepared by Electrospark Deposition[J]. Surface Technology, 2011, 40(3): 32—34.
- [51] 罗成, 董仕节, 熊翔, 等. 电火花沉积表面处理技术的应用进展[J]. 表面技术, 2009, 38(4): 53—56.
- LUO Cheng, DONG Shi-jie, XIONG Xiang, et al. Application Progress of Electrospark Deposition Surfacing Technology[J]. Surface Technology, 2009, 38(4): 53—56.
- [52] 赵晓春, 孙增伟, 刘晓明, 等. 电火花堆焊技术的研究及在电力轴类修复中的应用[J]. 热加工工艺, 2010(19): 170—172.
- ZHAO Xiao-chun, SUN Zeng-wei, LIU Xiao-ming, et al. Research and Application of Electric-spark Overlaying Process in Restoring Electric Axle Parts[J]. Hot Working Technology, 2010(19): 170—172.