

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2025.04.002

电参数对合金镀铁基体表面活化均匀性的影响

刘 勇, 董文仲*

(大连海事大学 辽宁省镀铁工程技术研究中心, 辽宁 大连 116026)

摘要: 在发动机曲轴轴颈表面制备铁基合金镀层时, 镀层与曲轴基体表面的结合强度是制约镀层发挥其性能的关键因素。在电镀初始阶段, 曲轴基体表面是否得到有效均匀活化是影响镀层与基体结合强度的关键因素。铁基镍钴合金镀铁液中, $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 浓度分别为 80 g/L 及 30 g/L, 镀液相对质量密度 1.22~1.23, 镀液温度 40 °C~50 °C, 镀液 pH 值 0.6~0.7。在保持阴阳极面积匹配、电极距离和活化时间等工艺规范相同的条件下, 通过调整正负向电压和电流密度进行电化学活化处理, 对采用不同电压差和电流密度进行活化后的轴颈表面状态及制备的镀层金相进行了对比、研究。结果表明: 保持正向电压 5 V, 正向电压比负向电压高出 0.2 V, 电流密度取 5 A/dm² 时, 活化处理 3 min, 基体表面可实现有效均匀活化, 活化处理后制备的镀层与基体界面无缺陷, 获得了高结合强度的沉积层。

关键词: 铁基合金镀层; 发动机曲轴; 均匀活化; 正负向电压差; 电流密度

中图分类号: TQ153.2

文献标识码: A

The influence of electrical parameters on the substrate surface activation uniformity during alloy-iron plating

Liu Yong, Dong Wenzhong*

(Iron Plating Engineering Technology Research Center of Liaoning Province,
Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: When preparing iron-based alloy coating on the engine crankshaft journal surface, the bonding strength between the coating and the crankshaft substrate surface is the key factor restricting the coating performance. In the initial electroplating stage, whether the crankshaft substrate surface is effectively and uniformly activated is a key factor affecting the bonding strength between the coating and the substrate. In iron-based nickel & cobalt alloy plating solution, the $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ and $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ concentrations were respectively 80 g/L and 30 g/L, and the specific gravity of the plating solution was about 1.22-1.23. Moreover, the temperature was set to 40 °C-50 °C and the pH value was 0.6-0.7. Under the same process specifications such as maintaining the anode and cathode matching areas, electrode distance, and activation time, electrochemical activation treatment was carried out by adjusting the positive and negative electrode voltages and current densities. The journal surface state after activation using different voltage differences and current densities, as well as the metallographic structure of the prepared coating,

收稿日期: 2024-11-25

修回日期: 2025-01-20

作者简介: 刘勇(1974—), 工程师, 研究方向为镀铁再制造技术, email: Dsd0411@126.com

通信作者: 董文仲(1965—), 教授级高工, 研究方向为镀铁再制造技术, email: dongwenzhong@dlmu.edu.cn

引用信息: 刘勇, 董文仲. 电参数对合金镀铁基体表面活化均匀性的影响[J]. 电镀与精饰, 2025, 47(4): 7-12, 25.

Liu Yong, Dong Wenzhong. The influence of electrical parameters on the substrate surface activation uniformity during alloy-iron plating[J]. 电镀与精饰, 2025, 47(4): 7-12, 25.

were compared and studied. The results indicate that when the positive electrode voltage is maintained at 5 V, the positive electrode is 0.2 V higher than the negative electrode, and the current density is set at 5 A/dm². After 3 minutes activation, the substrate surface achieve effective and uniform activation, and there is no defect at the prepared coating interface with the substrate, resulting in a deposition layer with high bonding strength.

Keywords: iron-based alloy coatings; engine crankshaft; uniform activation; voltage difference between positive and negative electrodes; current density

曲轴是发动机的关键部件,其制造工艺复杂,加工成本高,在使用过程中会产生磨损或严重擦伤,导致曲轴无法正常工作。通过电沉积纯铁或铁基合金可恢复曲轴磨损尺寸,并使其摩擦磨损和疲劳性能满足曲轴设计要求,而且该技术具有工艺简单、成本低等优点。通过镀铁技术再制造曲轴的成本仅为新造曲轴成本的20%~30%^[1-2],镀层硬度可达50~60 HRC,耐磨性能可达到或超过淬火42CrMo钢轴表面耐磨性^[3]。然而要充分发挥铁基合金镀层的性能,必须保证镀层与基体金属之间具有高的界面结合强度,而这正是制约镀层性能发挥的关键因素^[4-6]。洁净的工件表面是获得高结合强度的前提条件^[7-8],一般采用电化学活化来获得^[9-10]。但由于曲轴形状复杂,即使在镀液温度、酸度、密度,阴阳极面积匹配、电极距离,活化处理时间等工艺规范相同的条件下,曲轴各轴颈不同位置表面的活化情况也会不相同。为此,本论文通过调整正向电压差和电流密度,实现了曲轴表面有效均匀活化的目标。

1 实验

实验采用铁基镍钴合金镀铁液,其中NiCl₂·6H₂O和CoCl₂·6H₂O浓度分别为80 g/L及30 g/L。实验前应保证镀液洁净,无悬浮微粒且透明度高,镀液相对质量密度调整到1.22~1.23,温度范围为40℃~50℃,pH值区间为0.6~0.7。

镀槽采用玻璃钢制作,长度和宽度均为150 cm,深度为200 cm。电源为KDF可控硅镀铁专用电源。曲轴材质为42CrMo4,主轴颈直径为140 mm,连杆轴颈直径为100 mm,每次施镀轴颈表面积为32.15×10⁻² m²。

阴阳极面积比取 $S_{阴}:S_{阳}=1:6$,施镀时曲轴两侧分别悬挂3条阳极板。为保证电场分布均匀,阳极板应以曲轴为中心对称悬挂,两侧阳极板至曲轴中心线的距离均为45 cm。

本文研究的参数包括交流活化处理时的正负向电压差和电流密度。交流活化处理时取正向电压5 V保持不变,通过调整负向电压,使正负向电压差在0~1 V之间变化,电流密度在2 A/dm²至8 A/dm²之间变化。上述2个参数各取3个值,制定5个组合参数进行实验,详见表1。根据表1所列工艺电参数活化处理3 min后,从镀槽中提出曲轴,观察轴颈表面有效均匀活化状态。观察完毕后,立即将曲轴重新放入镀槽,并按照交流起镀-交流过渡镀-初转直流镀-直流过渡镀-全直流镀的工艺流程进行施镀4 h,后续将曲轴从镀槽中取出清洗。观察镀层表面形貌并分别切割主轴颈及连杆轴颈不同位置的镀层制作金相试样,观察镀层与基体结合处的显微组织,检查镀层结合情况。

表1 均匀活化处理电参数

Tab.1 Electrical parameter values for uniform activation treatment process experiments

工艺组别	电流密度/(A·dm ⁻²)	正负向电压差/V
工艺1	5	0
工艺2	2	0.2
工艺3	5	0.2
工艺4	8	0.2
工艺5	5	1.0

2 实验结果及分析

2.1 活化处理后轴颈表面状态

按照表1所列电参数,对曲轴活化处理前及处理后的轴颈表面状态见图1。



(a) 活化处理前



(b) 按照工艺 1 活化处理后



(c) 按照工艺 2 活化处理后



(d) 按照工艺 3 活化处理后



(e) 按照工艺 4 活化处理后



(f) 按照工艺 5 活化处理后

图 1 活化处理前后轴颈表面状态**Fig.1 Surface state before and after activation process**

图1(a)是曲轴活化处理前的轴颈表面状态,呈现明显的金属光泽。经过工艺1活化处理后的轴颈表面状态如图1(b)所示,其表面已失去金属光泽,呈现浅黑色。工艺1电流密度取 5 A/dm^2 ,正负向电压差取 0 V 。当正半波电流通过的瞬间,曲轴呈阴极,其表面有铁离子沉积和氢气析出;当负半波电流通过的瞬间,曲轴呈阳极,表面有铁的电解,同时析

出氧。虽然正负向电压差为 0 V ,但由于镀液电阻等因素的影响,阳极的电流效率总是大于阴极的电流效率,曲轴作为阳极时其轴颈表面铁离子的电解量要大于曲轴作为阴极时其轴颈表面铁离子的沉积量,在交流活化处理过程中轴颈表面总体呈电解趋势^[11-13],曲轴基体材料中所含的碳化铁析出并附着在轴颈表面而呈现浅黑色。

经过工艺2活化处理后的轴颈表面仍呈现较明显的金属光泽,但与未经活化处理的轴颈表面相比稍显发暗,见图1(c)。工艺2的特点是正负向电压差为 0.2 V ,虽然正向电压稍高于负向电压,但考虑到镀液电阻因素,轴颈表面铁离子电解量接近于沉积量^[14]。在活化电流密度(2 A/dm^2)较小的情况下,轴颈表面的铁离子电解和沉积量都较小,活化效果不明显,轴颈表面状态没有发生明显改变。

经过工艺3活化处理后的轴颈表面金属光泽明显减弱并呈现银白色,见图1(d)。与工艺2相比,工艺3所采用的正负向电压差仍保持 0.2 V ,电流密度为 5 A/dm^2 ,在此条件下,轴颈表面铁离子电解量接近于沉积量,且电镀尖端效应^[15]更加明显,镀件表面微观突起被电解削平,杂质被剥离,类似电解抛光,使基体纯净金属裸露^[16-17],待镀轴颈表面处于“微融合活化”状态^[18],呈现银白色。

工艺4采用电流密度 8 A/dm^2 ,正负向电压差 0.2 V 。活化处理后的轴颈表面金属光泽明显减弱并呈现轻微黑色,见图1(e)。这是由于电流密度增加,使得轴颈表面的铁离子沉积和电解量都比较大,电解时析出的碳化铁附着在轴颈表面使之颜色偏黑。

工艺5采用电流密度 5 A/dm^2 ,正负向电压差 1 V 。活化处理后的轴颈表面失去金属光泽,光滑发亮,呈现镀层的色泽,见图1(f)。这是因为,活化处理时正向电压比负向电压高 1 V ,轴颈表面铁离子电解量要显著小于铁离子沉积量,在活化处理过程中轴颈表面的铁离子总体呈电沉积的趋势,轴颈表面在没有得到有效“微融合活化”的情况下,就在活化处理阶段沉积了电镀层。

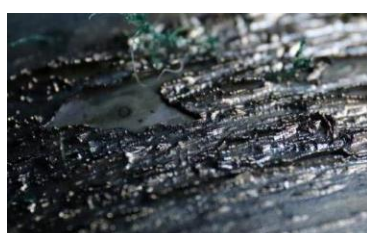
2.2 活化处理后制备的镀层表面状态

每次观察活化均匀性情况完毕后,立即将曲轴重新放入镀槽并按照交流起镀-交流过渡镀-初转直流镀-直流过渡镀-全直流镀的工艺流程施镀,直流施镀 4 h 后,将曲轴从镀槽中取出清洗干净。经不同工艺活化处理后所制备的镀层表面形貌见图2。

图2(a)和图2(d)是经过工艺1和4活化处理后所

制备的镀层形貌, 呈现疏松状态甚至发生大面积剥落。而经工艺2、3及5活化处理后所制备的镀层表面光滑, 未见剥离现象, 分别见图2(b)、(c)和(e)。

经工艺1和4活化处理后制备的镀层发生剥离的原因是活化处理过度。在活化处理过程中所析出的碳化铁附着在轴颈表面, 阻碍了镀层与基体的有效结合, 当镀层内部的拉应力^[19-20]随着镀层厚度的增加而逐渐变大时, 镀层发生剥离。



(a) 工艺 1 活化处理后制备镀层



(b) 工艺 2 活化处理后制备镀层



(c) 工艺 3 活化处理后制备镀层



(d) 工艺 4 活化处理后制备镀层



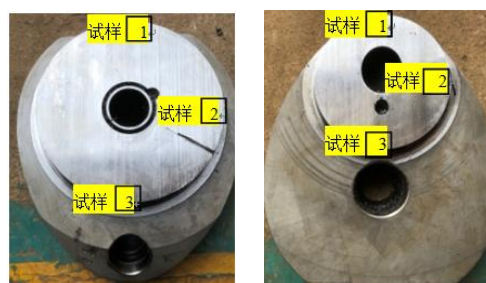
(e) 工艺 5 活化处理后制备镀层

图 2 不同工艺活化处理后所制备镀层表面形貌

Fig.2 Surface morphology of coatings deposited by different activation process

2.3 镀层与基体界面的显微组织

对经工艺2、3和5活化处理后所制备的曲轴轴颈镀层分别切割成金相试样。主轴颈及连杆轴颈的金相试样取样位置见图3所示。



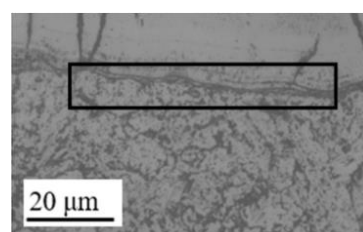
(a) 主轴颈取样位置

(b) 连杆轴颈取样位置

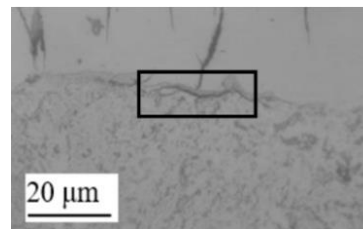
图 3 主轴颈及连杆轴颈取样位置

Fig.3 Sampling positions for main journals and crankpins

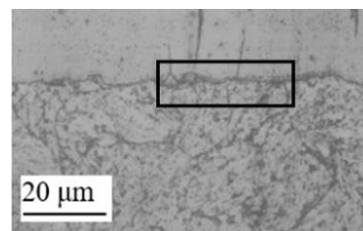
金相观察发现, 经工艺2活化处理后所制备的镀层, 在镀层与基体界面位置观察到一些长短不同、平行于基体界面的黑色线条, 见图4中黑色框内所示。这是因为在采用工艺2活化处理时, 虽然正负向0.2 V电压差可以保证轴颈表面铁离子电解量接近于沉积量, 但电流密度较小, 轴颈表面铁离子电解量和沉积量都比较小。当正半波电流通过时, 仅在轴颈表面微观凸起处形成镀层; 当负半波电流通过时, 仅将轴颈表面微观凸起的镀层或基体电解,



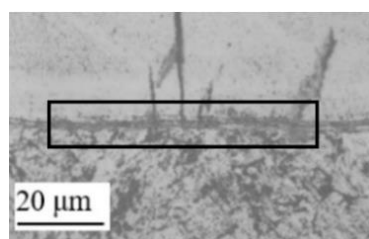
(a) 连杆轴颈试样 1



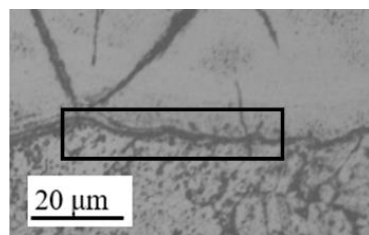
(b) 连杆轴颈试样 2



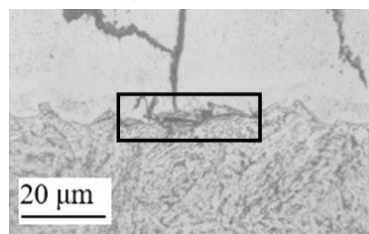
(c) 连杆轴颈试样 3



(d) 主轴颈试样 1



(e) 主轴颈试样 2



(f) 主轴颈试样 3

图 4 经工艺 2 活化处理后所制备镀层试样金相照片(1000X)

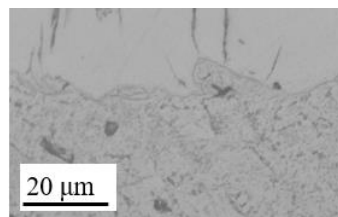
Fig.4 Metallographic photo of the coating sample deposited after process 2 activation treatment (1000X)

轴颈表面并不能得到有效均匀的活化。未得到有效活化的局部表面残留有氧化层或杂质,在镀层沉积过程中夹杂在镀层与基体之间,阻碍了镀层与基体的有效结合。

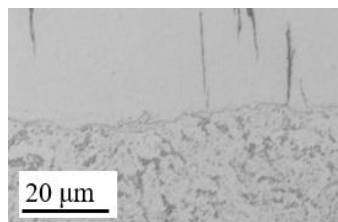
图5是曲轴经工艺3活化处理后所制备镀层试样金相照片。主轴颈及连杆轴颈各部位所取试样的镀层与基体均结合致密,没有观察到界面处存在结合不良的现象。证明该实验过程轴颈表面得到有效均匀活化,镀层能够与基体结合致密。

图6是曲轴经工艺5活化处理后所制备镀层试样金相照片,分别在主轴颈及连杆轴颈3个不同位置取得的试样上均发现镀层与基体局部结合不致密,有长短不同的黑色线条出现在镀层与基体界面处,见图6中黑色框内所示。这是活化不均匀造成的现象,证明工艺5不能对轴颈进行有效均匀活化。在正负向电压差为1 V,电流密度为5 A/dm²进行活化处理时,轴颈表面铁离子电解量小于沉积量,总体呈电沉积趋势。但由于尖端效应,轴颈表面微观凸起位置的电解量和沉积量都较大,该处得到有效活化,而凹陷处的镀层覆盖住基体表面的氧化层或杂

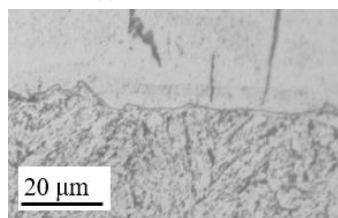
质,使之得不到有效活化,阻碍了镀层与基体的有效结合。



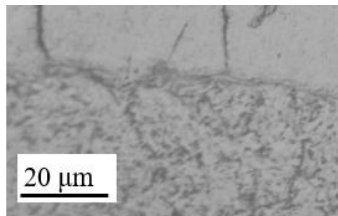
(a) 连杆轴颈试样 1



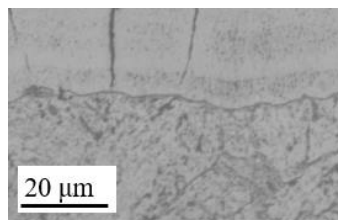
(b) 连杆轴颈试样 2



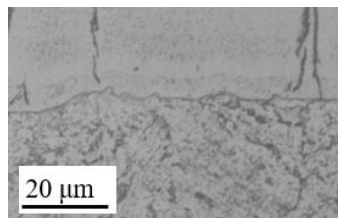
(c) 连杆轴颈试样 3



(d) 主轴颈试样 1



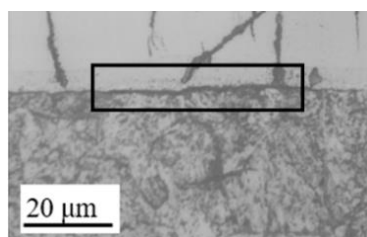
(e) 主轴颈试样 2



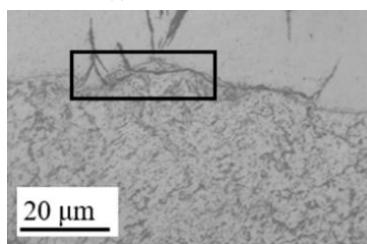
(f) 主轴颈试样 3

图 5 经工艺 3 活化处理后所制备镀层试样金相照片(1000X)

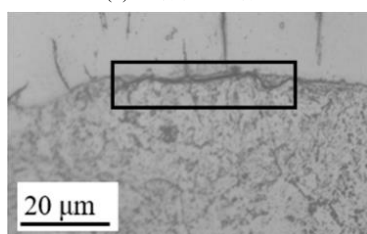
Fig.5 Metallographic photo of the coating sample deposited after process 3 activation treatment (1000X)



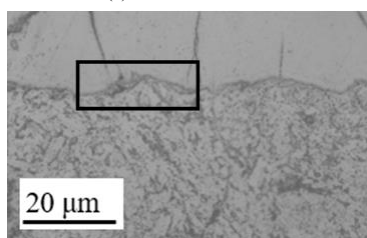
(a) 连杆轴颈试样 1



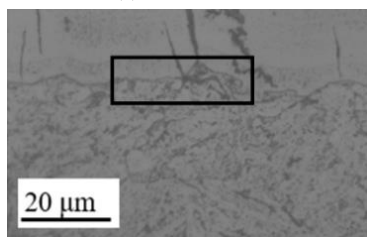
(b) 连杆轴颈试样 2



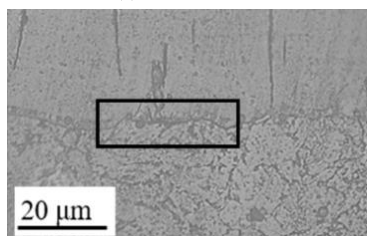
(c) 连杆轴颈试样 3



(d) 主轴颈试样 1



(e) 主轴颈试样 2



(f) 主轴颈试样 3

图 6 经工艺 5 活化处理后所制备镀层试样金相照片(1000X)

Fig.6 Metallographic photo of the coating sample deposited after process 5 activation treatment (1000X)

与工艺1和4活化处理过度造成镀层剥离不同,工艺2和5活化处理不充分不会对镀层造成明显的外观缺陷,但金相观察会发现镀层与局部基体之间未完全紧密结合,严重影响结合强度。

3 结论

在电化学活化处理时,保持正向电压5 V,正向电压比负向电压高出0.2 V,电流密度取5 A/dm²时,可使曲轴轴颈表面铁离子电解量与沉积量达到平衡;活化处理3 min后工件表面失去金属光泽,呈现银白色,达到“微融活化”状态,可实现有效均匀活化。采用上述参数活化处理后制备的镀层与基体界面无缺陷,可获得高结合强度的沉积层。

参考文献

- [1] 刘勇. 我国内燃机再制造行业发展现状、问题及建议[J]. 表面工程与再制造, 2024, 24(5): 44-49.
- [2] Choon M L, Wan S W, Young H R. Remanufacturing trends and issues[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing Green Technology, 2017, 4(1): 113-125.
- [3] 董文仲, 贾珊中, 阎军, 等. 曲轴铁基金属镀铁再制造技术工艺应用研究[J]. 柴油机, 2011, 33(2): 43-46.
- [4] 董文仲, 阎军, 贾珊中, 等. 合金镀铁层的结合和强化机理研究[J]. 中国表面工程, 2011, 24(1): 1-5.
- [5] 扈心坦. 电沉积铁前对称交流电对阴极表面的影响[J]. 电化学, 1995(3): 353-356.
- [6] Kang Y P, Chen L J, Sun T L, et al. Direct current iron plating without pre-etching and performance of iron deposit[J]. Surface Engineering, 2000, 16(6): 487-490.
- [7] 李明, 崔永植, 汪红. 无刻蚀镀铁交流活化机理的研究[J]. 东北工学院学报, 1993(2): 162-165.
- [8] Sridharan K, Sheppard K. Electrodeposition of amorphous iron-nickel-phosphorus alloy coatings[J]. Transactions of the IMF, 2017, 72(4): 153-158.
- [9] 董玉华, 董文仲, 董文祥. 无刻蚀镀铁新工艺及实用可靠性的研究[J]. 电镀与环保, 1986(4): 6-11.
- [10] 董文仲, 董文胜, 董文波, 等. 无刻蚀镀铁电沉积机理及综合性能[J]. 中国表面工程, 2011, 24(5): 1-7.
- [11] 谭玉芳, 孙桂香. 镀铁技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 1990: 41-45.
- [12] 扈心坦, 李希贺. 无刻蚀镀铁层结合强度的研究[J]. 理化检验(物理分册), 1996(4): 17-19.

下转 25 页