

# 电刷镀工艺对 Ni-Mo 合金镀层表面形貌与硬度的影响

徐立鹏, 包春江

(聊城大学 机械与汽车工程学院, 山东 聊城 252059)

**摘要:** 目的 优化电刷镀制备 Ni-Mo 合金镀层工艺, 并分析对镀层表面形貌和硬度的影响。方法 改变电极相对速度和工作电压, 获得不同电刷镀条件下的 Ni-Mo 合金镀层。采用金相显微镜观察镀层的表面形貌, 采用显微硬度计测试镀层的显微硬度。结果 最佳工艺为: 工作电压 14 V, 电极相对速度 11.3 m/min。镀层光亮致密, 显微硬度达到 503.90HV。结论 适当提高电极相对运动速度、工作电压, 能有效改进 Ni-Mo 合金镀层的沉积速度、表面形貌及显微硬度。

**关键词:** 电刷镀; Ni-Mo 合金; 表面形貌; 显微硬度

**中图分类号:** TQ153.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2014)04-0106-04

## Effect of Brush Plating Technology on the Coating Surface Morphology and Microhardness of Ni-Mo Alloys

XU Li-peng, BAO Chun-jiang

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China)

**ABSTRACT:** **Objective** To optimize the brush plating technology for the preparation of Ni-Mo alloy coating. **Methods** Based on orthogonal experiments, Ni-Mo coatings under various conditions were obtained by changing two process parameters, operating voltage and electrode relative speed. The surface morphology and microhardness of Ni-Mo alloy plating layers were studied using metalloscope and microhardness tester. **Results** The optimal parameters of brush plating Ni-Mo alloy were an operating voltage of 14 V and an electrode relative speed of 11.3 m/min. The surface of the coating was bright and dense, and the microhardness value was 503.90HV. **Conclusion** The research indicated that increasing electrode relative speed or operating voltage could effectively change the deposition rate, surface morphology and microhardness of Ni-Mo alloy coating.

**KEY WORDS:** brush plating; Ni-Mo alloys; surface morphology; micro-hardness

电刷镀合金镀层与单一金属相比, 强度大, 硬度高, 耐磨性好, 能有效延长零件使用寿命, 满足人们对金属制品表面提出的更高要求, 是镀铬镀层研究的主

流<sup>[1-3]</sup>。金属钼能改善合金耐腐蚀性和耐磨性, 但不能单独从水溶液中进行电沉积, 含钼镀层必须通过共沉积获得<sup>[4-7]</sup>。有研究发现<sup>[8-11]</sup>, Ni-Mo 合金具有较

收稿日期: 2014-03-21; 修订日期: 2014-05-10

Received: 2014-03-21; Revised: 2014-05-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(51275278); 山东省自然科学基金项目(Y2006F05)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China(51275278), Shandong Province Natural Science Foundation(Y2006F05)

作者简介: 徐立鹏(1988—), 男, 山东聊城人, 硕士研究生, 主要从事电刷镀技术研究。

Biography: XU Li-peng(1988—), Male, from Liaocheng, Shandong, Master, Research focus: brush plating.

通信作者: 包春江(1968—), 男, 辽宁阜新, 博士, 教授, 主要研究方向为摩擦学与表面技术。

Corresponding author: BAO Chun-jiang(1968—), Male, from Fuxin, Liaoning, Doctor, Professor, Research focus: tribology and surface technology.

高的机械强度和优越的耐腐蚀性,是极好的代镀铬材料,但关于 Ni-Mo 合金电刷镀工艺方面的研究尚未见报道。笔者通过改变工作电压和电极相对速度等工艺参数,在 45 钢表面制备 Ni-Mo 合金镀层,以表面形貌观察及显微硬度测试手段评价镀层性能,确定最佳工艺。

1 实验

1.1 电刷镀 Ni-Mo 合金工艺

Ni-Mo 合金镀液配方见表 1。

表 1 Ni-Mo 合金镀液配方

Tab.1 Formula of Ni-Mo plating solution

试剂名称	质量浓度/( g · L <sup>-1</sup> )
NiSO <sub>4</sub> · 6H <sub>2</sub> O	410 ~ 440
Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> · 2H <sub>2</sub> O	20 ~ 30
CH <sub>3</sub> COOH	15 ~ 25
C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> Na <sub>3</sub> O <sub>7</sub> · 2H <sub>2</sub> O	30 ~ 40
C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>7</sub>	30 ~ 40
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> · 10H <sub>2</sub> O	10 ~ 30
C <sub>12</sub> H <sub>25</sub> SO <sub>4</sub> Na	0.05 ~ 0.15

电刷镀试件为 45 钢圆环,规格为 φ50 mm×φ16 mm×10 mm。待刷镀面为试件的外圆柱面,其表面粗糙度为 1.6 μm。电刷镀采用 TD-60 型电刷镀电源、TDB-1Ⅱ型刷镀笔和 CY50 mm×25 mm 型石墨阳极。

刷镀前,通过表面预处理清除试件表面油污及氧化膜等,以提高镀层与基体的结合力<sup>[12-13]</sup>。刷镀工艺流程为:电净→活化液活化→刷镀特殊镍→刷镀 Ni-Mo 合金。每道工序之间需水冲洗。

由于电极相对速度、工作电压、镀液温度等工艺参数对镀层质量均有影响<sup>[14-19]</sup>,因此在室温下,通过改变刷镀工作电压和电极相对速度,在试件表面制备 Ni-Mo 合金镀层,正交试验因素及水平见表 2。

表 2 正交试验因素水平表

Tab.2 Factors and levels for the orthogonal experiment

水平	因素			
	A(电极相对速度)	B(工作电压)	A×B	A×B
	/( m · min <sup>-1</sup> )	压)/V		
1	5.8	12		
2	11.3	14		
3	22.8	16		

1.2 镀层测试

用秒表记录电刷镀时间,用 19JC 型万能工具显微镜(精度为 0.5 μm)测出试件电刷镀前后直径变化,计算镀层厚度和沉积速度。用 MDS 型金相显微镜搭配 Canon A630 数码相机观察镀层表面形貌。用 MHVD-1000IS 型显微硬度计测量镀层表面硬度,试验力为 50 N,加载时间为 15 s。用划痕法测试镀层结合强度。

2 结果与分析

2.1 正交试验及结果

电刷镀 Ni-Mo 合金正交试验方案和结果见表 3。

表 3 正交试验方案和结果

Tab.3 Design and results of the orthogonal experiment

试验号	A	B	A×B	A×B	镀层厚度/μm	沉积速度/( μm · min <sup>-1</sup> )	显微硬度(HV)
1	1	1	1	1	19	0.345	467.09
2	1	2	2	2	20	0.425	485.90
3	1	3	3	3	21	0.677	432.62
4	2	1	2	3	20	0.350	442.21
5	2	2	3	1	22	0.489	503.90
6	2	3	1	2	18	0.720	434.20
7	3	1	3	2	21	0.420	475.84
8	3	2	1	3	19	0.529	468.49
9	3	3	2	1	23	0.958	445.96

划痕试验时,划痕交叉处无起皮、脱落现象,表明镀层与基体结合很好。

2.2 对镀层沉积速度的影响

在不同的电刷镀工艺条件下,Ni-Mo 合金镀层沉积速度的极差分析结果见表 4,其中,K<sub>1</sub>,K<sub>2</sub>,K<sub>3</sub> 分别为各因素对应水平的沉积速度均值,R 为极差(后表同)。

表 4 关于沉积速度的极差分析

Tab.4 Range analysis of the deposition rate

因素	( μm · min <sup>-1</sup> )			
	A	B	A×B	A×B
K <sub>1</sub>	0.482	0.372	0.531	0.597
K <sub>2</sub>	0.520	0.481	0.578	0.522
K <sub>3</sub>	0.636	0.785	0.529	0.519
R	0.154	0.413	0.078	

从表 4 可知,工艺参数对 Ni-Mo 合金镀层沉积速度的影响由大到小依次为:工作电压>电极相对速度>电极相对速度与工作电压的交互作用。

从表 3 中镀层沉积速度的数据可知:在电极相对速度相同的条件下,刷镀工作电压为 12 V 时镀层沉积速度最慢,14 V 时镀层沉积较快,16 V 时镀层沉积最快。在电极相对速度相同的条件下,随刷镀工作电压增大,沉积速度明显加快。施镀电压相同,提高电极相对速度在一定程度上能加快镀层沉积速度,但效果不明显。

2.3 对镀层显微硬度的影响

在不同的电刷镀工艺条件下,Ni-Mo 合金镀层显微硬度的极差分析结果见表 5。

表 5 关于显微硬度的极差分析

Tab.5 Range analysis of the micro-hardness

因素	A	B	A×B	A×B
$K_1$	461.87	461.71	456.59	472.32
$K_2$	460.10	486.10	458.02	465.31
$K_3$	463.43	437.59	470.79	447.77
$R$	3.33	48.51	24.55	

从表 5 可知,影响 Ni-Mo 合金镀层显微硬度主次因素顺序为:工作电压>电极相对速度与工作电压的交互作用>电极相对速度。

由表 3 中镀层显微硬度的数据可知:电极相对速度较低时,随工作电压升高,镀层显微硬度先升后降。这是因为当工作电压较低时,晶核的生长率大于成核率,晶粒粗大,导致镀层显微硬度较低;当工作电压适度升高时,阴极极化作用增强,促进了 Ni-Mo 合金在电结晶过程中晶核的形成,抑制了晶核的生长,使得晶粒细化,显微硬度提高;当电压过大时,又会造成大量细晶核堆积,镀层疏松,导致硬度降低。电极相对速度较高时,由于工作电压与电极相对速度的交互作用,工作电压升高导致镀层显微硬度降低。

2.4 对镀层表面形貌的影响

在单独改变工作电压或电极相对速度的情况下,所获镀层的表面形貌均有明显差异。图 1 分别给出了试件在刷镀工作电压为 12,14,16 V,电极相对速度为 5.8,11.3,22.8 m/min 时,镀层在金相显微镜下的表面形貌。

图 1 显示,工作电压相同而电极相对速度由低到

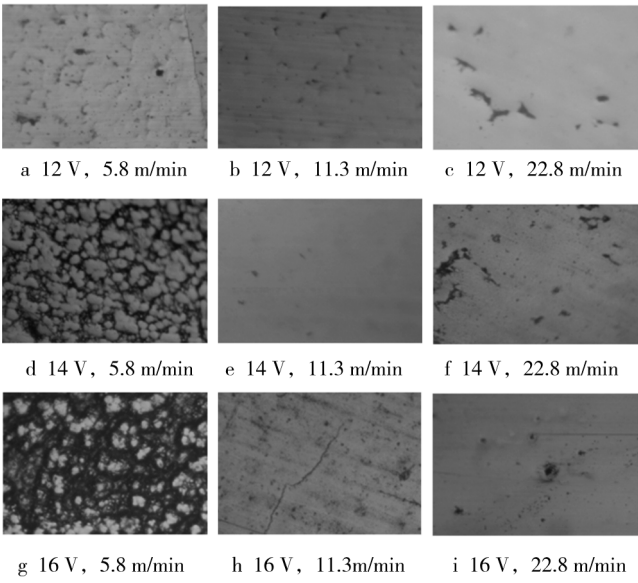


图 1 镀层表面形貌(200×)

Fig.1 Surface morphology of coatings (200×)

高时,所获镀层的表面形貌由粗糙变致密。这是因为电极相对速度较低时,浓差极化弱,晶粒粗大,峰与谷的高度差较大;随电极相对速度升高,浓差极化增强,晶粒细化,表面平整光滑;当电极相对速度过高时,镀层局部离子缺乏,部分镀层产生较大缺陷。因此,适当提高电极相对速度可改善镀层表面状况。

在电极相对速度相同时,刷镀工作电压变化引起镀层表面形貌的变化十分显著。对比图 1a,d,g 可知,在电极相对速度较低的情况下,低压所获镀层较高压镀层平整。这是因为刷镀工作电压较低时,极化作用弱,沉积速度慢,金属离子沉积均匀;随着刷镀工作电压的升高,极化作用加强,沉积速度加快,镀层峰高与谷底间的高度差逐渐拉大,工作电压越高,镀层越粗糙。当工作电压与电极相对速度相匹配时,镀层表面光滑细腻,如图 1e 所示。

3 结论

1) 影响 Ni-Mo 合金电刷镀层沉积速度的因素由主到次依次为工作电压、电极相对速度、工作电压与电极相对速度的交互作用;影响镀层显微硬度的因素由主到次依次为工作电压、工作电压与电极相对速度的交互作用、电极相对速度。

2) 电刷镀 Ni-Mo 合金的最佳工艺为:刷镀工作电压 14 V,电极相对速度 11.3 m/min。镀层光亮致密,显微硬度达到 503.90HV。

3) 适当提高工作电压和电极相对速度,可提高 Ni-Mo 合金电刷镀层的沉积速度、显微硬度,改善镀层表面状况。工作电压和电极相对速度过高会导致镀层出现缺陷。

## 参考文献

- [1] 梁志杰. 现代表面镀覆技术[M]. 北京:国防工业出版社,2005.  
LIANG Zhi-jie. The Plating Technology of Modern Surface [M]. Beijing: National Defence Industry Press,2005.
- [2] 徐滨士. 中国再制造工程及其进展[J]. 中国表面工程, 2010,23(2):1—6.  
XU Bin-shi. Remanufacture Engineering and Its Development in China[J]. China Surface Engineering, 2010, 23 (2):1—6.
- [3] 任雪峰,杨培霞,刘安敏,等. 代铬镀层的研究进展[J]. 化学通报,2013,76(1):39—45.  
REN Xue-feng, YANG Pei-xia, LIU An-min, et al. Research Progress of Substitute Chromium Coating[J]. Chemistry Online, 2013, 76(1):39—45.
- [4] SANCHES L S, DOMINGUES S H, CARUBELLI A, et al. Electrodeposition of Ni-Mo and Fe-Mo Alloys from Sulfate-Citrate Acid Solutions[J]. Journal of the Brazilian Chemical Society, 2003, 14(4):556.
- [5] 高诚辉,李凝. 碱性镀液电沉积非晶-纳米晶 Ni-Mo 合金工艺探讨[J]. 材料保护, 2010, 43(7):27—31.  
GAO Cheng-hui, LI Ning. Study on Electrodeposition Amorphous-nanocrystalline Ni-Mo Alloy from Alkaline Solution [J]. Materials Protection, 2010, 43(7):27—31.
- [6] WESEMANN I, HOFFMANN A, MROTZEK T, et al. Investigation of Solid Solution Hardening in Molybdenum Alloys [J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2010, 28(6):709—715.
- [7] CHASSAING E, PORTAIL N, LEVY A, et al. Characterisation of Electrodeposited Nanocrystalline Ni-Mo Alloys [J]. Journal of Applied Electrochemistry, 2004, 34(11):1085—1091.
- [8] 杜楠,赵晴. 电沉积非晶态镍-钼合金及其镀层结构的研究[J]. 材料保护, 1994, 27(11):8—12.  
DU Nan, ZHAO Qing. Study on the Deposition of Amorphous Nickel-Molybdenum Alloy and Its Coating Structure of Electrical [J]. Materials Protection, 1994, 27(11):8—12.
- [9] 韩庆,孙克宁,董晓辉. 脉冲电镀制备 Ni-Mo 合金镀层及其析氢性能[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2009, 30(5):704—707.  
HAN Qing, SUN Ke-ning, DONG Xiao-hui. Preparation of Ni-Mo Alloy Coating by Pulse Plating and Its HER Activity [J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2009, 30(5):704—707.
- [10] BELTOWSKA E, BIGOS A, INDYKA P, et al. Electrodeposition and Characterisation of Nanocrystalline Ni-Mo Coatings[J]. Surface & Coatings Technology, 2012, 211(11):67—71.
- [11] MEENU S, ANANDAN C, WILLIAM V K. Ni-Mo-Co Ternary Tilloy as a Replacement for Hard Chrome [J]. Applied Surface Science, 2013, 285(B):167—174.
- [12] 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.  
BAO Chun-jiang, WANG Rui-li. Experimental Research on Surface Pretreatment Process in Electro-brush Plating [J]. Surface Technology, 2010, 39(3):78—81.
- [13] ETAAT M, EMAMY M, GHAMBARI M, et al. Surface Treatment and Nickel Plating of Iron Powder Metallurgy Parts for Corrosion Protection[J]. Materials and Design, 2009, 30(9):3560—3565.
- [14] 石林,吕钊钦,许斌. 镍钨合金刷镀工艺正交回归试验研究[J]. 农业机械学报, 1999, 30(2):121—124.  
SHI Lin, LYU Zhao-qin, XU Bin. An Orthogonal Regression Experiment on Nickel Tungsten Alloy Brush Plating Technology [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1999, 30(2):121—124.
- [15] 杨建文,贺朝晖,杨杰,等. 铝合金化学镀镍工艺研究[J]. 表面技术, 2011, 40(2):65—68.  
YANG Jian-wen, HE Zhao-hui, YANG Jie, et al. Study on the Process of Electroless Ni Coating Deposited on the 6061 Aluminum Alloy [J]. Surface Technology, 2011, 40(2):65—68.
- [16] 杨余芳,文朝晖,李强国,等. Fe-Co 合金箔电沉积工艺研究[J]. 功能材料, 2011, 42(S1):85—88.  
YANG Yu-fang, WEN Zhao-hui, LI Qiang-guo, et al. Study on the Electrodepositing Technology of Fe-Co Alloy Foil [J]. Journal of Functional Materials, 2011, 42(S1):85—88.
- [17] 陈康,黄蕙. 工艺条件对镍基-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 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-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Particle Composite Brush Plating under Different Process Conditions [J]. Surface Technology, 2011, 40(3):75—78.
- [18] 刘光明,刘德强,汪元奎,等. T91 钢表面复合电沉积 Ni/CrAl 镀层的工艺研究[J]. 表面技术, 2012, 41(1):61—63.  
LIU Guang-ming, LIU De-qiang, WANG Yuan-kui, et al. Preparation of Ni/CrAl Coatings on T91 Steel by Composite Electrodeposition [J]. Surface Technology, 2012, 41(1):61—63.
- [19] 张馥,石磊,张明晓,等. 电镀锌铁合金工艺及光亮剂的研究[J]. 表面技术, 2013, 42(4):79—82.  
ZHANG Fu, SHI Lei, ZHANG Ming-xiao, et al. Research on Electric Galvanized Iron Alloy Process and Brightener [J]. Surface Technology, 2013, 42(4):79—82.