

W、P 含量对 Ni-W-P 化学镀层硬度和耐磨性的影响

刘畅, 刘贯军, 李勇峰, 马利杰

(河南科技学院 机电学院, 河南 新乡 453003)

摘要: **目的** 使 Ni-W-P 合金镀层具有最大的硬度和耐磨性, 通过试验寻找镀层中的最优 W、P 含量。**方法** 通过改变化学镀液中钨酸钠的加入量 (0~75 g/L) 制备出不同 W、P 含量的 Ni-W-P 镀层。用扫描电镜和能谱仪分析镀层中 W、P 的含量, 用显微硬度计测试镀层的硬度, 用球盘式摩擦磨损试验机测试镀层的摩擦系数和磨损率。对比分析镀层的硬度与镀层中的 W、P 含量, 研究它们之间的内在关系。通过 X 射线衍射仪对镀层进行物相分析, 探索 W、P 含量与镀层中典型物相之间的关系, 进而分析其与镀层硬度和耐磨性的关系。并用同样的方法研究了时效处理条件下镀层化学成分与镀层硬度、耐磨性之间的关系。**结果** 试验条件下, 当 P 的质量分数低至 6% 左右时, 镀态镀层硬度最大, 耐磨性最好。镀层经过 400 °C × 1 h 时效处理后, 当 P 的质量分数为 8.5% 左右、W 的质量分数为 7.5% 左右时, 镀层有最大的硬度和耐磨性。**结论** 镀态下, 镀层的硬度主要随 P 含量的增大而减小, W 含量对其影响不大。时效态下, 镀层的硬度主要随 W 含量的增大而增大, P 含量对其影响不大。

关键词: 化学镀 Ni-W-P; 镀层结构; 硬度; 耐磨性

中图分类号: TQ153 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)05-0239-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.05.037

Effect of W and P on Hardness and Wear Resistance of Ni-W-P Electroless Plating

LIU Chang, LIU Guan-jun, LI Yong-feng, MA Li-jie

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 453003, China)

ABSTRACT: The work aims to make Ni-W-P alloy plating possess the greatest hardness and wear resistance and find out the optimum contents of W and P in plating through test. Ni-W-P electroless plating with different W and P contents were prepared by changing the addition amount of sodium tungstate (0~75 g/L) in electroless plating bath. Contents of W and P were analyzed by SEM and EDS, hardness of plating was tested by microhardness tester and friction factor and wear rate of plating were de-

收稿日期: 2017-10-20; 修订日期: 2017-11-25

Received: 2017-10-20; **Revised:** 2017-11-25

基金项目: 河南科技学院“标志性创新工程”计划经费资助 (203010916004); 河南科技学院 2015 攀登计划 (重大科研项目) 经费资助 (203010915004)

Fund: Henan Institute of Science and Technology Funding for Landmark Innovation Project (203010916004) and Henan Institute of Science and Technology Funding for the Climbing Program (Major Research Projects) (203010915004)

作者简介: 刘畅 (1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为化学复合镀层在高速钢刀具上的应用。

Biography: LIU Chang (1993—), Male, Master graduate, Research focus: application of electroless composite coating in high speed steel cutter.

通讯作者: 刘贯军 (1963—), 博士, 教授, 主要研究方向为化学镀、离子氮化等金属表面工程技术。

Corresponding author: LIU Guan-jun (1963—), Doctor, Professor, Research focus: electroless plating and ion nitriding surface engineering technology.

tested by plating ball-plate friction and wear tester. Hardness of plating and contents of W and P in plating were analyzed by contrast to study the internal relation. X-ray diffractometer was used to analyze the phase of plating to detect the relation between contents of W and P and typical phase in plating so as to study the relation between phase and plating harness and wear resistance. The same method was adopted to investigate the relation between chemical compositions, hardness and wear resistance of plating at aging treatment condition. At test condition, when mass fraction of P reached about 6%, the plating at plating condition had the greatest hardness and the best wear resistance. After aging treatment for 1 h at 400 °C, fraction mass of P and W respectively reached about 8.5% and 7.5% and plating had the largest hardness and wear resistance. At plating condition, the hardness of plating decreases as the content of P increases, but the effect of W on the hardness is minor. At aging treatment, the hardness of plating can increase as the content of W improves, but the effect of P on the harness is minor.

KEY WORDS: Ni-W-P electroless plating; structure; hardness; wear resistance

化学镀 Ni-P 合金镀层因其优良的物理、化学和力学性能而被广泛应用。但随着科学技术的发展,其在某些方面应用时已经不能满足更高硬度和耐磨性等要求。在 Ni-P 二元合金中分别引入 W、Cu、Co、Sn、Zn 等元素得到三元合金镀层,拓展了化学镀层的应用范围^[1-2],特别是高硬度、高熔点和低线膨胀系数的 W 元素的引入,使得 Ni-W-P 三元合金镀层具有比 Ni-P 镀层更高的硬度和耐磨性能,倍受关注^[3-7]。

刘宏等^[8]研究发现通过改变镀层中 P 的含量,可以控制镀层晶粒尺寸、结构及孔隙率,此外还发现热处理温度小于 400 °C 时, P 含量少的镀层硬度均高于 P 含量多的镀层;热处理温度大于 400 °C 时,镀层硬度随着 P 含量的增加而增大。胡永俊等^[9]研究了 W 对 Ni-W-P 三元镀层硬度和耐磨性的积极影响,但由于样本数较少,且没有涉及到含 P 量不同所产生的影响,不能完整地反映出 W 含量对 Ni-W-P 镀层硬度和耐磨性的影响规律。F J HE 等^[10]研究了不同退火温度对 Ni-W-P 镀层结构和硬度的影响规律,并肯定了 W 所起的强化作用,但对 W 含量变化对镀层结构和硬度的影响方面没有涉及。J N Balaraju 等^[11-12]比较详细地研究了不同 W、P 含量对 Ni-W-P 三元镀层结构和硬度的影响规律。

本文也用相似的方法对该类问题进行了更加详细的研究,可能由于镀层制备条件(镀液化学组分等)不一样,所获得的镀层结构有所不同,因而具体镀层的硬度值也不一样。尽管如此,关于镀液中钨酸钠的添加量对镀层中 W、P 含量的影响规律,本文与 J N Balaraju 等人的研究仍得出了相似的结论。在此基础上,本文还进一步研究了 W、P 含量对 Ni-W-P 三元合金镀层耐磨性的影响规律。

1 实验

化学镀所用基体材料为 Q235,试样尺寸为 40 mm×25 mm×1 mm。实验在碱性化学镀液(pH 值为

8.0~8.5,镀液温度为(90±2) °C)中进行,施镀时间为 2 h。镀液主要成分为:硫酸镍 20 g/L,次亚磷酸钠 25 g/L,柠檬酸钠 35 g/L,无水醋酸钠 20 g/L,钨酸钠(0~75 g/L),十二烷基硫酸钠 0.02 g/L,适量添加剂。根据钨酸钠添加量的不同,分别得到 16 种不同 W、P 含量的 Ni-W-P 三元合金镀层备用。

镀层形貌观察和镀层中 W、P 含量检测在 Quanta200 扫描电子显微镜(配能谱仪)上进行。镀层硬度用 VMH-002V 型显微硬度计测量,所加载荷为 100 g,保压时间 15 s,每个试样测量 5 次,去掉最大值和最小值,取其余 3 个测量值的平均数作为镀层的硬度值。镀层的晶体结构分析在 Philips X'pert MPD Pro 型 X 射线衍射仪(Cu K α 靶, $\lambda=0.154056$ nm)上进行。摩擦磨损性能测试在 MS-T3000 型球盘式摩擦磨损试验机上进行,摩擦副为 $\phi 4$ mm 的 Al₂O₃ 磨球,试验载荷 400 g,滑动速度 20 m/min(折算旋转半径为 6 mm,转速约 530 r/min),共旋转滑动 5000 圈(折算摩擦时间约 9.43 min)。采用失重法对镀层进行磨损率计算,并用 LEICA DMI8 M 型金相显微镜对磨痕进行辅助观察和测量。

2 实验结果与讨论

2.1 镀层形貌及化学成分

图 1 所示为镀液中钨酸钠加入量分别为 35、75 g/L 时所得化学镀层的形貌。比较两图可以看出,两种镀层表面都光滑平整且颗粒比较均匀,由此可知,镀液中钨酸钠的添加量对镀层表面形貌的影响较小。

图 2 为镀液中钨酸钠用量从 0 g/L 逐渐增加到 75 g/L 时镀层中 W 和 P 含量的变化情况。可以看到,镀层中 P 含量随着镀液中钨酸钠加入量的增加而逐渐减少,其质量分数从 12.39% 逐渐减少到 4.9%。之所以这样, J N Balaraju^[11]认为是钨酸钠的加入抑制了 H₂PO₂⁻ 的反应,进而减少了镀层中 P 的含量。此外他

还认为复合物的形成也会减少 P 的析出。但是镀层中 W 含量的变化趋势却存在一个峰值,即当镀液中钨酸钠加入量由 0 g/L 逐渐增加到 35 g/L 时,镀层中 W 含量达到最高(质量分数为 7.32%),此后,随着钨酸钠加入量的增加,镀层中的 W 含量逐渐减少。这与文献[11]的研究结果是基本一致的,所不同的是,文献[11]中镀层含 W 量最高时所对应的镀液中钨酸钠加入量为 20 g/L。之所以这样,可能与镀液组分、pH 值及施镀温度不同有关。

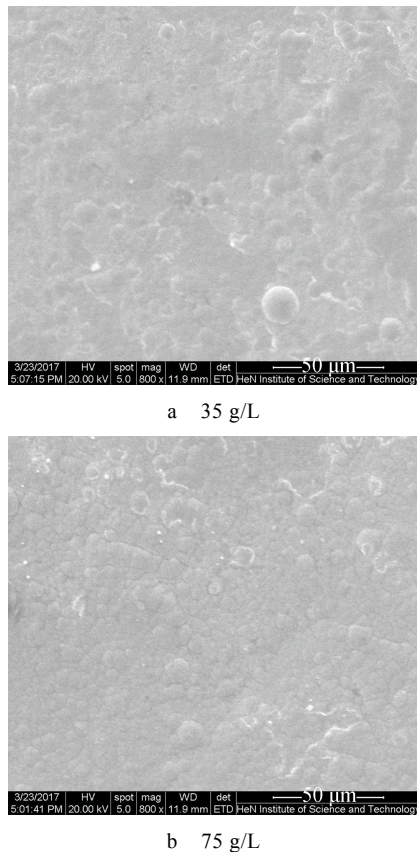


图 1 镀液中钨酸钠加入量不同时所得 Ni-W-P 化学镀层的形貌

Fig.1 Morphology of Ni-W-P electroless plating under different amounts of sodium tungstate in the bath

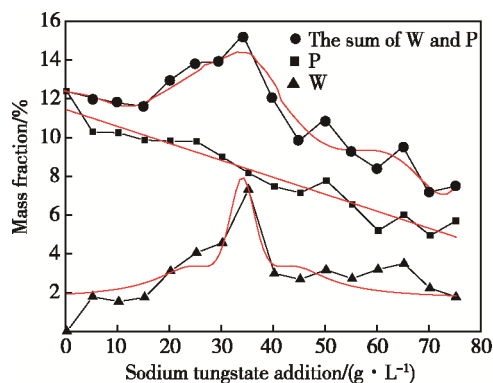


图 2 镀液中钨酸钠添加量对镀层中 W 和 P 含量的影响
Fig.2 Effect of sodium tungstate added in the bath on the content of W and P in the plating

2.2 镀层结构

镀液中钨酸钠加入量不同时所获得的 16 种 Ni-W-P 镀层在镀态下的 XRD 衍射图谱如图 3 所示。由图可知,镀态下 Ni-W-P 镀层的衍射峰均为典型的“馒头峰”,两侧比较平滑,衍射强度较晶态结构弱了很多,只有在 44° 出现唯一的衍射峰 Ni(111), P 和 W 相关的衍射峰都没有出现,这说明 P、W 原子无规律地排列在 Ni 间隙中^[13-14]。从图 3 还可以看出,随着镀液中钨酸钠加入量的增多,衍射峰变得越来越尖锐,衍射强度也越来越大,这说明镀层的晶化程度越来越高。图 2 显示,随着镀液中钨酸钠加入量由 0 g/L 逐渐增加到 75 g/L,镀层中 P 的质量分数由 12.59% 逐渐减少到 5.70%。由此可以看出,镀层中 P 含量的多少对镀态下的镀层结构有直接影响,即 P 含量越少,镀层的晶化程度越高,这与文献[15]研究结果是一致的。文献[15]研究表明,当镀层中 P 的质量分数大于 8% 时,镀层呈现非晶状态;镀层 P 质量分数为 5%~7% 时,镀层为非晶和纳米晶混合状态;当 P 的质量分数小于 4% 时,镀层为微晶结构。但是,研究仅是针对 Ni-P 镀层,未涉及 W 含量的变化对镀层结构有何影响。

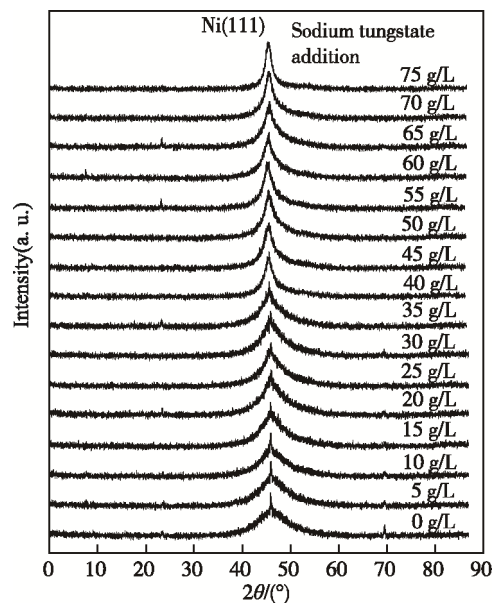


图 3 镀态 Ni-W-P 镀层的衍射图

Fig.3 XRD pattern of Ni-W-P plating as-plated

图 4 所示为镀液中钨酸钠加入量不同时所获得的 16 种 Ni-W-P 镀层经过 400 °C×1 h 时效处理后的 XRD 衍射图谱。图 4 显示,所有镀层中均有明显的 Ni、Ni₃P 相,即经过时效处理后,镀层结构由镀态下的非晶态和纳米晶相转化为晶态。镀液中钨酸钠加入量小于 30 g/L (即镀层中 P 的质量分数高于 9.00%) 时,镀层结构出现亚稳相 (Ni₅P₄、Ni₅P₂),这主要与 P 含量有关。当 P 含量较高时,镀层非晶化程度高,400 °C×1 h 时效处理后镀层还未完全晶化。此外,图

4 中钨酸钠添加量为 0 g/L 的衍射图并没有亚稳相的出现, 对比分析认为是 W 的存在阻碍了 Ni_3P 的析出[16]。当 P 含量相对少时 (钨酸钠加入量大于 30 g/L 时), 镀层镀态下晶化程度较高, $400\text{ }^\circ\text{C}\times 1\text{ h}$ 时效处理后, 镀层中的亚稳相转化为稳定相 (Ni_3P 、Ni)。由图 4 还可以看到, 镀液中钨酸钠加入量越少, 镀层组织中的 Ni_3P 相数量越多, 结合图 2 可知, 此时镀层中的 P 含量就越高。

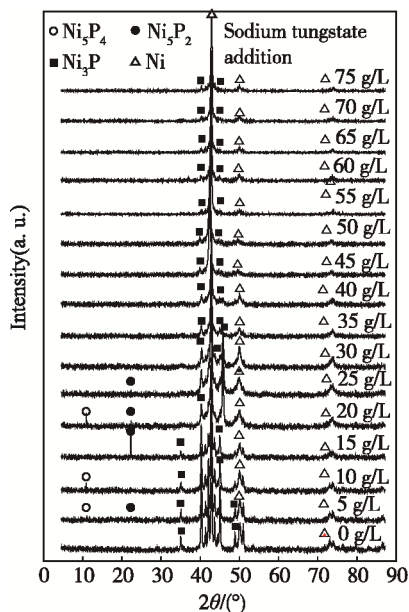


图 4 经 $400\text{ }^\circ\text{C}\times 1\text{ h}$ 时效处理后 Ni-W-P 镀层的 XRD 衍射图

Fig.4 XRD pattern of Ni-W-P plating after $400\text{ }^\circ\text{C}\times 1\text{ h}$ aging treatment

2.3 镀层硬度

图 5 为镀液中钨酸钠加入量不同时所得 16 种 Ni-W-P 合金镀层的硬度。由图可知, 无论是镀态, 还是时效态, Ni-W-P 合金镀层的硬度均随着镀液中钨酸钠加入量的增大而增大。还可以看到, 与 Ni-P 二元合金镀层相比, W 的引入整体上提高了 Ni-W-P 合金镀层的硬度, 这是 W 产生固溶强化的结果。图 5 还显示, 镀液中钨酸钠加入量为 75 g/L (Ni-W-P 合金镀层的 P、W 质量分数分别为 5.70% 和 1.78%) 时, 其镀态镀层的硬度是同条件下 Ni-P 合金镀层 (P 的质量分数为 12.39%) 镀态硬度的 1.4 倍。

结合图 2 分析可知, 当镀液中钨酸钠加入量为 35 g/L 时, 镀层中 W 含量最高 (W 的质量分数为 7.32%, P 的质量分数为 8.17%), 但其硬度却不是最大的, 而硬度最大的镀层 W 的质量分数仅为 1.78% (P 的质量分数为 5.70%, 所用镀液中钨酸钠的加入量为 75 g/L)。这主要与 P 的含量有关, P 含量越高, 镀层非晶化程度也越高, 镀层的硬度反而会越小; 相反, 镀层 P 含量越低, 镀层晶化程度越高, 抵抗塑性变形的能力越强, 从而硬度越高[17]。在这里, 尽管 W 作为异质原子有固溶强化的作用, 但在非晶和纳米晶

条件下与 P 一样效果甚微, 而在微晶条件下虽有强化作用, 但 W 含量相对 P 含量来说又少了很多。由此可以认为, 是 P 含量的多少导致了镀层结构的改变, 并进而影响到镀层的力学性能。至于 W 对镀层结构 (晶化程度) 的影响效果有待进一步研究。

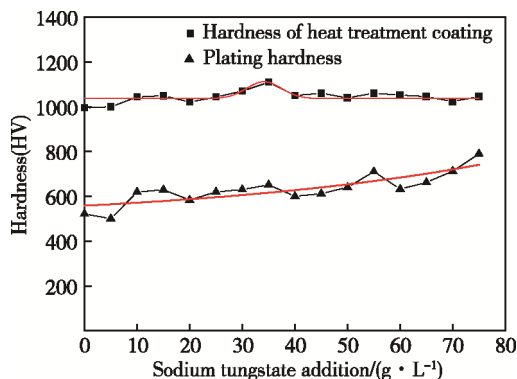


图 5 镀层硬度与镀液中钨酸钠加入量的关系

Fig.5 Relationship between the hardness of the plating and the amount of sodium tungstate added in the bath

镀层经过 $400\text{ }^\circ\text{C}\times 1\text{ h}$ 时效处理后, 此时镀层中的 Ni (W,P) 固溶体与 Ni_3P 的析出量将决定镀层硬度大小[18]。图 5 显示, 经过时效处理后镀层的硬度虽然整体上比镀态镀层的硬度高很多, 但就时效处理后的镀层来说, 虽然其 P 含量相差很大, 但其硬度却相差不大, 只有钨酸钠加入量为 35 g/L 的镀液所制备的镀层的硬度最高。结合图 2, 该镀层有最高的 W 含量 (质量分数为 7.32%) 和较高的 P 含量 (质量分数为 7.86%)。这说明, 相同条件下, W 的固溶强化效果比 P 强[19]。

2.4 镀层耐磨性

图 6 是镀液中钨酸钠加入量分别为 0、35、75 g/L 时所得镀层在一定条件下的磨损率, 表 1 为相应的摩擦系数。可以看出, 镀层在镀态下的磨损率及摩擦系数随镀液中钨酸钠加入量的增加而不断减小。热处理后磨损率及摩擦系数最小时均为钨酸钠加入量为 35 g/L 时, 说明钨酸钠加入量 35 g/L 时的镀层耐磨性最好。

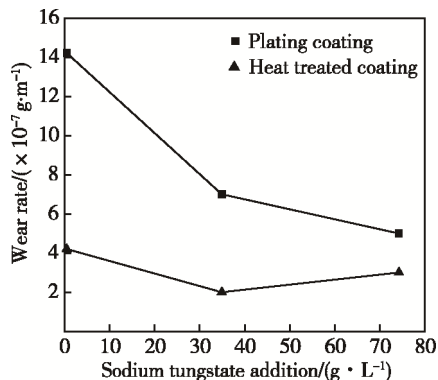


图 6 镀层磨损率与镀液中钨酸钠加入量的关系

Fig.6 Relationship between the wear rate of plating and the amount of sodium tungstate added in the bath

表 1 镀液中钨酸钠加入量不同时镀层的摩擦系数
Tab.1 Friction factor of the plating under different amounts of sodium tungstate added in the bath

| The amount of sodium tungstate/(g·L ⁻¹) | 0 | 35 | 70 |
|---|--------|--------|--------|
| As-plated | 0.4599 | 0.4345 | 0.4110 |
| 400 ℃×1 h aging treatment | 0.4549 | 0.4001 | 0.4078 |

图 7 是不同化学镀层的磨痕图。可以看到，在镀态下，磨痕宽度最小为图 7c 中的镀层，此时钨酸钠加入量为 75 g/L，这主要是由于钨酸钠的逐渐增多导致了镀层中 P 含量的减少，进而使镀层晶化程度增

大，硬度随之增大，最终使磨痕宽度减小。400 ℃×1 h 时效处理后，此时镀层的硬度取决于镀层中的 W、P 的总含量，更确切地说，是取决于镀层中 Ni₃P 化合物的多少以及 W、P 两元素在 Ni (W,P) 固溶体中的总固溶量^[20]。由图 2 可知，当镀液中钨酸钠的加入量为 30~35 g/L 时，镀层中的 W、P 元素质量分数之和最大。图 5 也显示，此时的镀层硬度最大，因此，图 7b 中的镀层(钨酸钠加入量为 35 g/L)经过时效处理后有最小的磨痕宽度。如果以摩擦系数及磨痕宽度来衡量镀层的耐磨程度，图 7 的结果与图 6 和表 1 是吻合的。

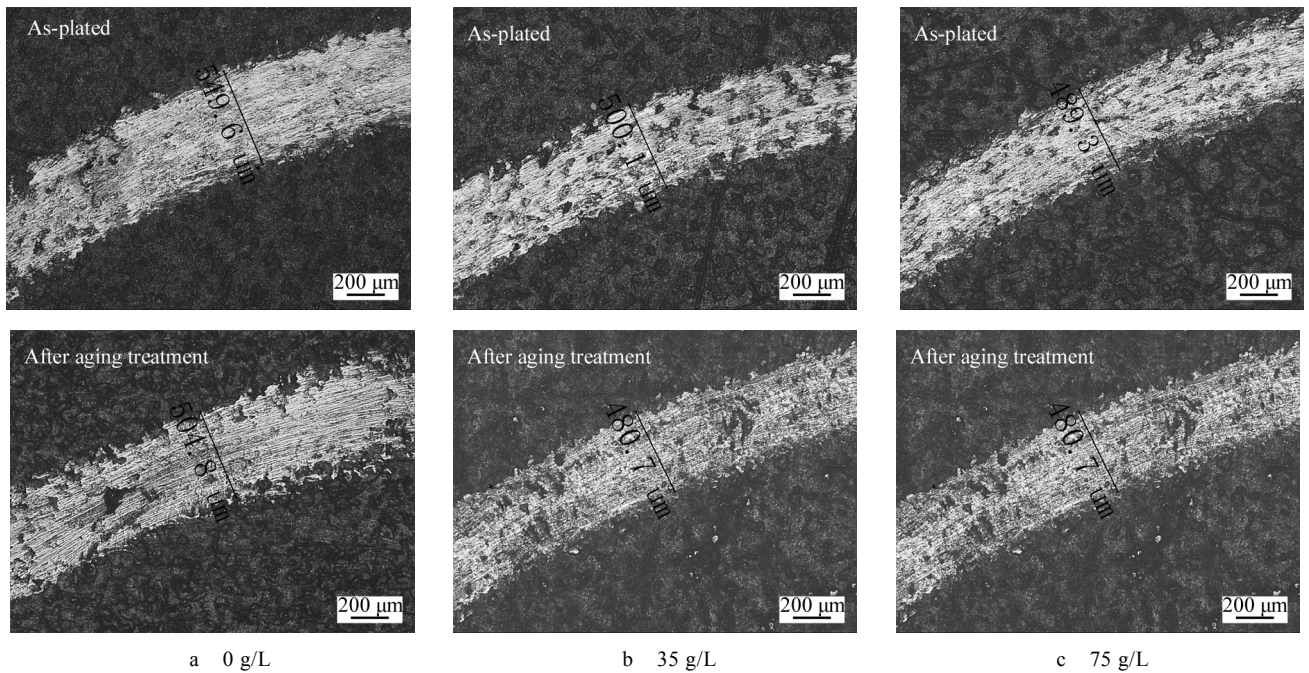


图 7 不同化学镀层的磨痕图
Fig.7 Wear tracks in different test conditions for electroless plating

综合分析图 5、图 6、表 1 和图 7，无论是镀态，还是时效态，Ni-W-P 合金镀层的耐磨性主要由镀层硬度和摩擦系数决定：镀层硬度越高，耐磨性越好；摩擦系数越小，耐磨性越好。

3 结论

- 1) 随着镀液中钨酸钠加入量的增加，Ni-W-P 合金镀层中 W 含量先增后减，钨酸钠加入量为 35 g/L 时，镀层中的 W 含量达到最大(质量分数为 7.32%)，镀层中的 P 含量则线性减少。
- 2) Ni-W-P 合金镀层的镀态结构主要由镀层中的 P 含量决定，W 含量对镀态镀层结构影响不大。镀层镀态结构决定镀层硬度。
- 3) 400 ℃×1 h 时效处理后，镀层硬度由 Ni₃P 析出量以及 W、P 两元素在 Ni (W,P) 固溶体中的总固溶量决定。

- 4) 镀层耐磨性主要由硬度和摩擦系数决定，硬度高，摩擦系数小，耐磨性好。

参考文献：

[1] 姚怀, 裴清华, 王喜然. 铝合金化学镀 Ni-W-P 三元合金组织及性能的研究[J]. 表面技术, 2010, 39(3): 26-28.
YAO Huai, CHANG Qing-hua, WANG Xi-ran. Study on the Microstructure and Properties of Electroless Ni-W-P Plating on Aluminium Alloy[J]. Surface Technology, 2010, 39(3): 26-28.

[2] 刘宏, 郭荣新, 宗云, 等. 化学沉积 Ni-P/Ni-W-P 合金的热处理晶化及磨损行为[J]. 材料热处理学报, 2011, 32(2): 139-145.
LIU Hong, GUO Rong-xin, ZONG Yun, et al. Annealing Crystallization and Wear Behavior of Electroless Deposited Ni-P and Ni-W-P Coatings[J]. Transactions

- of Materials and Heat Treatment, 2011, 32(2): 139-145.
- [3] 饶乾阳, 蒙继龙, 吴大庆, 等. 镁合金化学镀 Ni-W-P 合金的研究[J]. 表面技术, 2005, 34(3): 27-29.
RAO Qian-yang, MENG Ji-long, WU Da-qing, et al. Electroless Plating of Ni-W-P Alloy on Magnesium Alloy[J]. Surface Technology, 2005, 34(3): 27-29.
- [4] YAO H, ZHU G L, DU M. The Research on Technology of Electroless Ni-W-P Ternary Alloys Plating on the Aluminum Alloy[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 117-119: 1338-1342.
- [5] LIU H, GUO R X, VIEJO F, et al. Comparison of Microstructure and Residual Stress Characteristics of Electroless Ni-W-P Coatings Annealed with a Laser and a Furnace[J]. Surface and Coatings Technology, 2012, 206(8-9): 2380-2387.
- [6] LIU H, YAO H L, LIU Y, et al. Crystallisation and Performance Characteristics of High-temperature Annealed Electroless Ni-W-P Coatings[J]. Crystal Research and Technology, 2014, 49(2-3): 178-189.
- [7] 王天旭, 蒙继龙, 胡永俊. 铝合金化学镀 Ni-W-P 合金耐磨性研究[J]. 表面技术, 2005, 34(3): 27-29.
WANG Tian-xu, MENG Ji-long, HU Yong-jun. Study on Wear Resistance of Electroless Ni-W-P Plating on Aluminium Alloy[J]. Surface Technology, 2005, 34(3): 27-29.
- [8] LIU H, GUO R X, LIU Z. Effects of Laser Nanocrystallisation on the Wear Behaviour of Electroless Ni-W-P Coatings[J]. Surface & Coatings Technology, 2013, 219(219): 31-41.
- [9] 胡永俊, 熊玲, 蒙继龙. 钨含量对铝合金化学镀 Ni-W-P 硬度和耐磨性的影响[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(5): 737-742.
HU Yong-jun, XIONG Ling, MENG Ji-long. Effect of Content of Tungsten on Hardness and Wear Resistance of Electroless Ni-W-P Plating on Aluminium Alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 17(5): 737-742.
- [10] HE F J, FANG Y Z, JIN S J. The Study of Corrosion-Wear Mechanism of Ni-W-P Alloy[J]. Wear, 2014, 311(1-2): 14-20.
- [11] BALARAJU J N, KALAVATI, RAJAM K S. Surface Morphology and Structure of Electroless Ternary NiWP Deposits with Various W and P Contents[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 486(1-2): 468-473.
- [12] BALARAJU J N, KALAVATI, MANIKANDANATH N T, et al. Phase Transformation Behavior of Nanocrystalline Ni-W-P Alloys Containing Various W and P Contents[J]. Surface and Coatings Technology, 2012, 206(10): 2682-2689.
- [13] HU Y J, WANG T X, MENG J L, et al. Structure and Phase Transformation Behaviour of Electroless Ni-W-P on Aluminium Alloy[J]. Surface & Coatings Technology, 2006, 201(3-4): 988-992.
- [14] 郑志军, 高岩. 钨对化学镀 Ni-W-P 合金镀层结构及性能的影响[J]. 电镀与环保, 2005, 25(3): 19-22.
ZHENG Zhi-jun, GAO Yan. Effect of Tungsten on Structure and Properties of Electroless Ni-W-P Alloy Coating[J]. Electroplating and Pollution Control, 2005, 25(3): 19-22.
- [15] YAN M, YING H G, MA T Y. Improved Microhardness and Wear Resistance of the As-deposited Electroless Ni-P Coating[J]. Surface and Coatings Technology, 2008, 202(24): 5909-5913.
- [16] 刘宏, 郭荣新. 磷含量对化学镀 Ni-W-P 合金热处理晶化及电化学反应的影响[J]. 材料热处理学报, 2012, 33(8): 121-129.
LIU Hong, GUO Rong-xin. Effects of Phosphorus Contents on Annealing Crystallization and Electrochemical Behavior of Electroless Deposited Ni-W-P Coatings[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2012, 33(8): 121-129.
- [17] 宗云, 郭荣新, 何冰清, 等. 不同镀液组分对化学沉积 Ni-W-P 合金层组织和性能的影响[J]. 表面技术, 2009, 38(6): 9-12.
ZONG Yun, GUO Rong-xin, HE Bing-qing, et al. Effect of Different Bath Constituent on the Micro Structure and Properties of Electroless Deposition of Ni-W-P Alloys[J]. Surface Technology, 2009, 38(6): 9-12.
- [18] PALANIAPPA M, SESHADRI S K. Friction and Wear Behavior of Electroless Ni-P and Ni-W-P Alloy Coatings[J]. Wear, 2008, 265(5): 735-740.
- [19] AIZHRANI A, ALHAMED Y, PETROV L, et al. Mechanical and Corrosion Behavior of Amorphous and Crystalline Electroless Ni-W-P Coatings[J]. Journal of Solid State Electrochemistry, 2014, 18(7): 1951-1961.
- [20] 马壮, 刘艳梅, 李智超, 等. 热处理对 27SiMn 钢化学镀 Ni-W-P 层组织与性能的影响[J]. 金属热处理, 2011, 36(5): 58-62.
MA Zhuang, LIU Yan-mei, LI Zhi-chao, et al. Influence of Heat Treatment on Microstructure and Properties of Ni-W-P Electroless Plating on 27SiMn Steel[J]. Heat Treatment of Metals, 2011, 36(5): 58-62.