

钨含量对铝合金化学镀 Ni-W-P 硬度和耐磨性的影响

胡永俊, 熊 玲, 蒙继龙

(华南理工大学 机械工程学院, 广州 510641)

摘要: 研究铝合金化学镀 Ni-W-P 三元合金的耐磨性能, 探讨钨含量对铝合金(LY12)化学镀 Ni-W-P 耐磨性和硬度的影响。结果表明: 铝合金表面化学镀 Ni-W-P 三元合金在 400 °C 加热 1 h 后, 表面硬度达 HV₂₅1 080, 表面硬度和耐磨性均较基体提高 10 倍以上; 但过高的 W 含量, 使得表面硬度下降。磨损实验发现, 试样产生了镀层碎裂和剥落现象。其主要原因是由于铝合金基体与镀层热膨胀系数的差异及 Ni₃P 的析出导致应力过大, 引起镀层硬度和耐磨性随着 W 含量的增加而下降。并用化学镀 Ni-W-P 合金沉积机理解释了镀层成分分布特征的形成原因。

关键词: Ni-W-P 合金; 化学镀; 耐磨性

中图分类号: TQ 153.1

文献标识码: A

Effect of content of tungsten on hardness and wear resistance of electroless Ni-W-P plating on aluminium alloy

HU Yong-jun, XIONG Ling, MENG Ji-long

(College of Mechanical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: The wear resistance of electroless Ni-W-P coatings on aluminium alloy was studied, the effect of content of tungsten on the wear resistance and hardness of electroless Ni-W-P deposits was discussed. The results show that the hardness of deposit heated at 400 °C for 1 h is HV₂₅1 080, and the wear resistance and hardness of deposits heated at 400 °C for 1 h are ten times more than those of aluminium matrix. With increasing content of W, the hardness of Ni-W-P coatings decreases. Disintegration and spall on the Ni-W-P deposits heated at 400 °C for 1 h were generated after abrasion test because of the excessive stress caused by different coefficient of thermal expansion between matrix materials and deposits and precipitation of Ni₃P. The characteristic of electroless Ni-W-P deposits composition distribution is explained by aggradational deposition mechanism of electroless Ni-W-P deposits.

Key words: Ni-W-P alloy; electroless plating; wear resistance

铝以质量轻、比强度高、防锈蚀性能好且易于回收利用等性能备受人们重视。其主要弱点是质软、摩擦系数高、耐磨性差、容易拉伤且难以润滑等, 而这些弱点可以通过表面处理来克服。化学镀镍基合金是赋予铝及铝合金表面良好性能的新型工艺手段, 自 20 世纪 80 年代中期以来, 在国外发展很快, 美国化学镀镍占铝合金镀覆的 25%, 现在已在军事、电子、航天及计算机等领域广泛采用。例如飞机和航空母舰的弹射机罩与轨道、军用坦克铝质后视镜、铝质雷达导

管、导弹红外追踪器、计算机硬盘及接插件等电子元件。电子设备微波元件及天线组件若采用铝合金化学镀镍新工艺既能满足质量轻要求, 又具有良好的电磁屏蔽和焊接性能, 并能显著提高其表面硬度、耐磨性、耐腐蚀性和附着力以及电磁屏蔽性能的可靠性。

自 1963 年, Pearlstein 首次成功地制备了化学镀 Ni-W-P 三元合金以来, 由于这种镀层具有优良的热稳定性和比 Ni-P 合金镀层更强的耐蚀性和耐磨性, 因此, 此工艺不断被人们改进和完善。

目前,国内外对钢基体化学镀 Ni-W-P 合金报道较多,化学镀 Ni-W-P 合金镀层具有以下特点^[1-12]:

1) Ni-W-P 合金镀层的结合力无论是镀态还是经热处理后均较 Ni-P 镀层好;

2) 镀层硬度高,经 400℃ 热处理后超过硬铬镀层的硬度;

3) 金属 W 的共沉积提高了合金镀层的熔化温度和热稳定性,使它适用于更高温度下的工作条件;

4) 三元 Ni-W-P 合金镀层的耐磨性明显高于二元 Ni-P 镀层的;

5) 由于 Ni-W-P 合金镀层的抗蚀性比 Ni-P 合金的高,因此在严酷的化学环境中,特别是在酸性环境中作为防护性镀层;

6) 由于 Ni-W-P 合金镀层大大改善了 Ni-P 合金由于温度变化而引起电阻率变化的弊端,具有良好的热稳定性,因而,在电子工业上取代 Ni-P 合金被用作薄膜电阻。

将 W 引入 Ni-P 合金镀层,制备出 Ni-W-P 三元合金镀层,使其在性能上超过化学镀 Ni-P 合金,就可以更好地适应化学镀技术应用的需要。

铝合金基体上化学镀 Ni-P 合金报道并不多见^[13-15],而铝合金基体上化学镀 Ni-W-P 合金耐磨性的研究和随着化学镀 Ni-P 合金中 W 含量的升高而变化的研究就更少^[16-17],而 W 含量影响 Ni-W-P 合金的结构、耐磨性、耐蚀性及硬度等性能方面则几乎未见报道。本文作者主要针对钨含量对铝合金化学镀 Ni-W-P 镀层表面硬度和耐磨性能的影响并对镀层的磨损机理进行探讨,以期对铝合金化学镀 Ni-W-P 的研究与应用有所指导。

1 实验

选用铝合金 LY12, LY12 经除油和酸蚀后再进行碱性闪镀液闪镀,再进行常规化学镀 Ni-W-P 合金。碱性预镀镍液和化学镀 Ni-W-P 三元镀液组成及条件分别如表 1 和 2 所列,研究中样品 1(Ni-4.23%W-5.26%P as-plated)和 2(Ni-7.96%W-9.16%P as-plated)的镀液组成只是钨酸钠的添加量不相同,其他条件相同。

化学镀 Ni-W-P 三元合金镀层结构的 X 射线衍射分析采用 Philips X'pert MPD Pro 型 X 射线分析衍射仪(XRD)进行分析,采用 Cu K_α 靶, λ=0.154 056 nm。经过测定实验中所制备的样品镀态均为非晶结构。

采用配有能谱分析(EDS, INCA300 型)的 LEO 1530VP 型扫描电镜(SEM)观察镀层镀层磨损区的微观形貌,并做微区成分分析,测定 Ni, P 和 W 的含量及其分布情况。化学镀 Ni-W-P 三元合金镀层的耐磨实验在 M200 型磨损试验机上进行,负荷 98 N,转速 400 r/min, 20[#]机油润滑。对磨轮材质为 GCr15, HRC 59~62。采用 HVS-1000 维氏显微硬度计测定镀层镀态的硬度值,载荷 0.25 N,时间为 15 s,每个试样取 5 个测试点,取平均值。

2 结果和讨论

2.1 镀层硬度特征及 W 含量对镀层硬度的影响

不同镀层表面硬度对比结果如表 3 所列。基体的

表 1 化学镀碱性预镀镍液的组成及条件

Table 1 Bath composition and operating conditions of electroless flash plated Ni-P alkaline bath

Nickle sulfate hexahydrate/(mol·L ⁻¹)	Compound complex agent/(mol·L ⁻¹)	Organic addition agent/(g·L ⁻¹)	Stabilizer/(g·L ⁻¹)	pH	Temperature	Time/s
0.038	0.38	3-5	20-30	10-11 (adjusted with NaOH)	Indoor temperature	10-15

表 2 化学镀 Ni-W-P 三元合金镀液组成及条件

Table 2 Bath composition and operating conditions of electroless Ni-W-P bath

Nickle sulfate hexahydrate/(g·L ⁻¹)	Sodium hypophosphite monohydrate/(g·L ⁻¹)	Sodium tungstate/(g·L ⁻¹)	Compound complex agent B/(g·L ⁻¹)	Stabilizers/(mg·L ⁻¹)	Buffering agent/(g·L ⁻¹)	Wetting agent/(mg·L ⁻¹)	pH	Temperature/℃
15	15-30	20-50	25-45	1-2	10	60-80	8.5-9	85±2

表 3 Ni-W-P 三元合金镀层和铝合金磨损率和硬度的对比

Table 3 Comparison of hardness and wear rate of between Ni-W-P ternary deposits and aluminum alloy

Material	Hardness/ (kg·mm ⁻²)	Wear volume/ (mm ³ ·h ⁻¹)	Wear rate/ (10 ⁻⁵ mm ³ ·m ⁻¹)
LY12	96±9	0.069 0	0.779 8
Sample 1	680±25	0.013 8	0.156 1
Sample 2	560±20	—	—
Sample 1 heated at 400 °C for 1 h	1 080±40	0.006 4	0.072 4
Sample 2 heated at 400 °C for 1 h	1 032±42	0.008 0	0.089 9

硬度相对较低, 化学镀 Ni-W-P 三元合金镀层镀态硬度可达到 HV 560~680, 与 GCr15 对磨轮硬度接近。在保护气氛中 400 °C 保温 1 h 后, 镀层硬度较镀态进一步提高, 可以超过 HV 1 000, 与 38CrMoM 钢氮化处理相当。镀层硬度随 W 和 P 含量变化而变化。样品 2 镀层虽然 W 含量(7.96%)高于样品 1 镀层(4.26%), 但其所测硬度值却低于样品 1 镀层的。比较两种镀层热处理后的硬度, 样品 1 镀层高于样品 2 的。且在测量 400 °C 加热 1 h 后, 样品 2 镀层的表面硬度时发现显微硬度仪的压头作用下, 压痕周围镀层出现微裂纹。该现象的出现, 主要是由于铝合金基体与 Ni-W-P 镀层的热膨胀系数差别较大(铝合金、Ni 和 W 的热膨胀系数见表 4^[18]所列), 铝基材的热膨胀系数大于 Ni-W-P 镀层的, 表现为张应力, 镀层表现为压应力, W 的加入有进一步增大内应力的趋势。图 1 所示为 Ni-W-P 镀层在 400 °C 加热 1 h 后的 X 射线衍射谱。从图 1 可知, Ni₃P 已经析出, Ni-W-P 镀层体积收缩, 张应力加大, 镀层变脆^[19]。

表 4 金属的线膨胀系数

Table 4 Linear coefficient of thermal expansion

Metal	Linear coefficient of thermal expansion/ (10 ⁻⁶ °C ⁻¹)
Al	24
Ni	13
W	5

2.2 镀层磨损性能及 W 含量对耐磨性的影响

不同镀层分别在镀态与热处理后与基体材料的磨损性能比较结果如图 2 所示。从图 2 中可看出, LY12 基体和样品 1 Ni-W-P 镀态镀层在摩擦磨损实验初期, 磨损量较大, 该阶段为磨合期, 磨合期过后, 磨损量

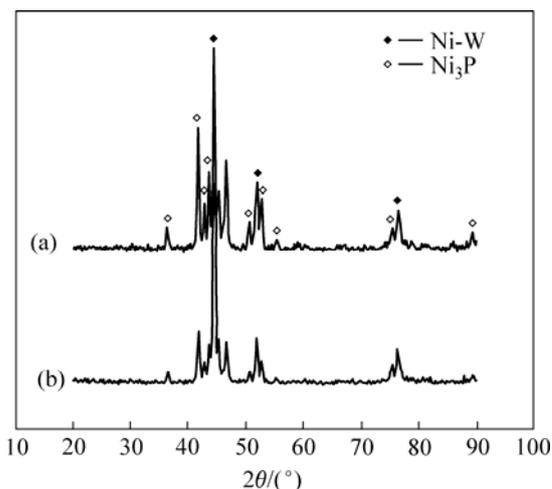


图 1 Ni-W-P 镀层在 400 °C 下热处理 1 h 的 X 射线衍射谱
Fig.1 X-ray diffraction patterns of Ni-W-P electroless deposits heat treated at 400 °C for 1 h: (a) Sample 2 Ni-W-P heated at 400 °C for 1 h; (b) Sample 1 Ni-W-P heated at 400 °C for 1 h

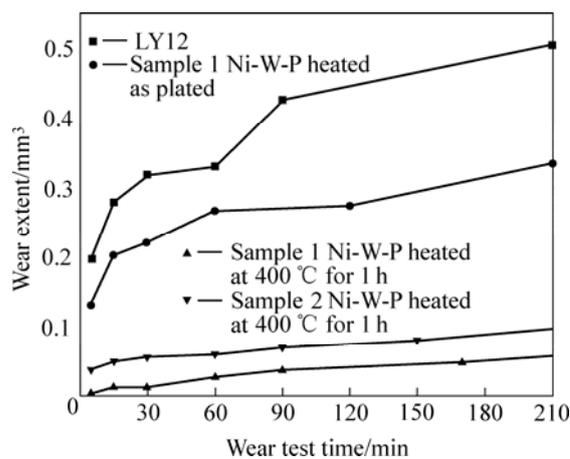


图 2 铝合金和化学镀 Ni-W-P 镀层磨损时间与磨损量的关系
Fig.2 Relationship of wear time and wear volume of aluminium matrix and electroless Ni-W-P deposits

大为下降, 耐磨性能已经明显比基体的高数倍。而经 400 °C 加热 1 h 后, Ni-W-P 三元合金镀层的磨合期很短暂; 经热处理后, Ni₃P 析出镀层耐磨性能进一步提高, 特别是样品 1 Ni-W-P 三元合金镀层在 400 °C 加热 1 h 后的磨损率是基体的十分之一。表 3 所列为磨损率对比结果。Koiwa 等^[6]认为, Ni-W-P 固溶体由于低 P 而造成增强粒子 Ni₃P 在热处理后析出减少, 从而提高镀层与基体的结合力。但从表 3 及图 2 可看出, 经 400 °C 加热 1 h 后, 样品 2 耐磨性能并没有随着 W 含量的升高而升高。其主要原因也是由于铝合金基体与镀层的热膨胀系数的差异及 Ni₃P 的析出导致过大应力的产生引起镀层耐磨性随着 W 含量的增加而下降。

从表3及图2可以看出, 镀层的耐磨损性能是随硬度增加而提高。

2.3 磨损区微观形貌的分析

不同镀层磨损区的微观形貌如图3所示。由于样品1镀态是均匀的非晶结构, 具有一定的塑性, 故磨损面平整连续(见图3(a))。化学镀Ni-W-P三元合金镀层镀态硬度可达到HV 560~680, 与GCr15对磨轮的硬度接近, 在机油润滑下, 表现为对磨轮中硬颗粒在镀层表面滑动磨损, 形成明显的划痕, 镀层磨损量相对较大。

图3(b)所示为样品1在400℃加热1h的磨损面,

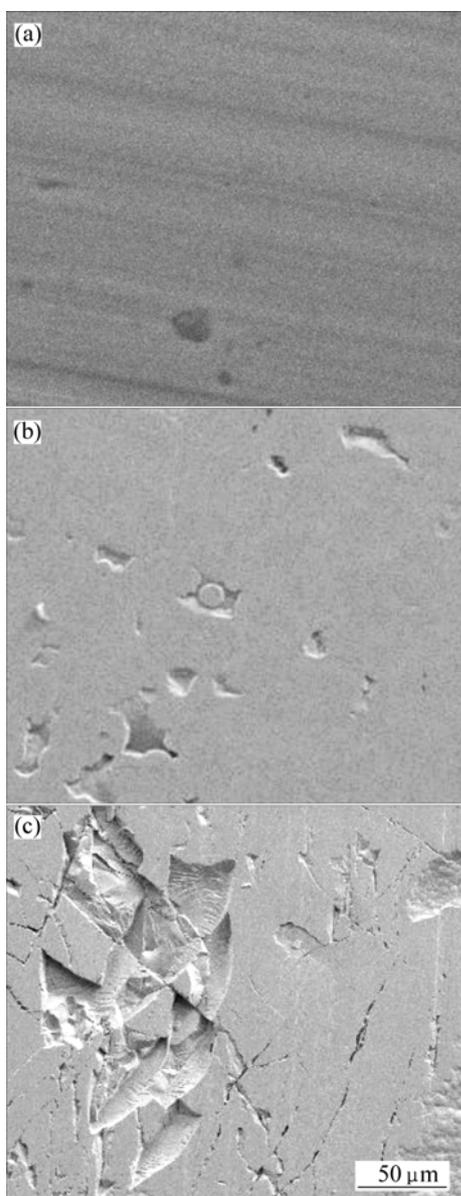


图3 不同镀层磨损区的微观形貌

Fig.3 Microstructure of wear of different deposits: (a) As-plated; (b) Sample 1, 400 °C; (c) Sample 2, 400 °C

样品1镀层热处理后硬度高达HV 1 080, 远高于对磨轮的硬度。故磨损面十分光亮平整, 观察不到对磨轮造成的磨痕, 没有裂纹和镀层有少量的剥落出现。图3(c)所示为高W含量的样品2镀层热处理后的磨损面。从图3中明显可以看出, 磨损面镀层局部剥落。这主要是由于镀层内应力过大, 镀层变脆的结果。同时, 在磨损面上还有许多细微裂纹, 也是应力作用的结果。样品2镀层热处理后硬度高达HV 1 032, 远高于磨轮的硬度, 因此在磨损面的未剥落区, 表面十分光滑平整, 也观察不到对磨轮造成的磨痕。从SEM像分析可知, 高硬度和低应力的镀层具有较好的耐磨损性能。

本研究发现: P含量随着W含量的增加而增加, 且在本研究条件下, 经400℃加热1h后, 当W含量为4.23%及P为5.26%时, 化学镀Ni-W-P三元合金镀层的硬度较高, 耐磨损性能较好, 但镀层已有少量的剥落出现。随着W和P含量的增加, 在相同的条件下, 化学镀Ni-W-P三元合金镀层的张应力增大、镀层变脆, 化学镀Ni-W-P三元合金镀层的硬度和耐磨损性能下降。这与文献[20]的结论吻合。

2.4 镀层成分分布特征及其机理的探讨

图4所示为样品1镀层400℃保温1h后磨损面的扫描电镜背散射图像。图4中明亮处是W含量较高

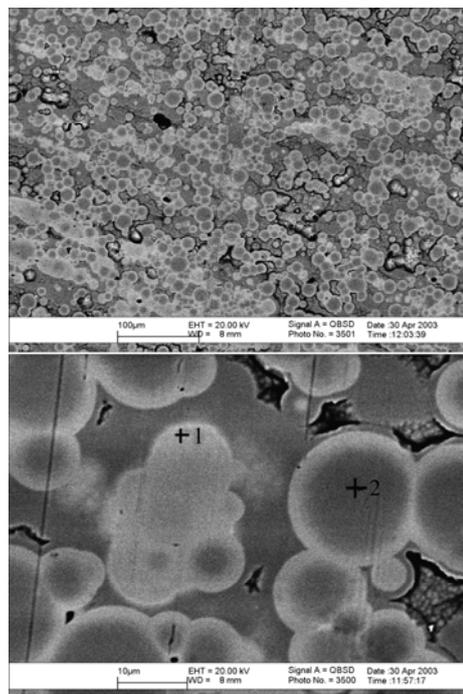


图4 样品1镀层热处理后磨损面的扫描电镜背散射图像

Fig.4 BF image of wear microstructure of sample 1 deposit as heat-treated

的部分, 而暗区为低 W 区, 这是因为 W 的原子序数较 Ni 高的缘故, 光亮和暗微区能谱分析如表 5 所列。从图 4 中可明显看出, W 在镀层中分布并不均匀。

表 5 经 400 °C 加热 1 h 后样品 1 镀层微区的能谱分析结果
Table 5 Analysis results of energy spectrum of sample 1 deposit heated at 400 °C for 1 h (mass fraction, %)

Spot	C	P	S	Ni
1	0.45	5.54	0.68	86.2
2	0.41	4.81	0.58	92.5
Spot	Sr	Mo	W	Total
1	1.82		5.28	100
2			1.66	100

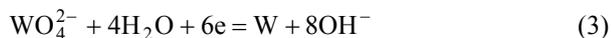
由于单独的金属钨是不能从水溶液中沉积出来的, 因此在合金电镀中将钨与铁族元素的共沉积称为诱导共沉积, 并提出了相应的机理。在化学镀 Ni-W-P 合金中, 人们亦将钨的析出机理归结于诱导共沉积^[21]。和其他共沉积过程相比, 诱导共沉积很难从理论上预测镀液组成及工艺条件对合金组成的影响^[22]。

Ni-W-P 三元合金化学镀是利用强还原剂次磷酸盐的氧化, 使镍离子还原成金属镍, 钨酸根离子还原成钨, 次磷酸钠提供磷原子, 形成 Ni-W-P 三元合金镀层的。其反应过程如下^[23]:

氧化反应:



还原反应:



副反应:



由反应原理可以看出: 在化学镀 Ni-W-P 的过程中, Ni^{2+} 还原成 Ni, WO_4^{2-} 还原成 W, H_2PO_2^- 转变成 HPO_3^{2-} 并提供 P 原子, 在整个过程中都有 OH^- 存在。当镀液呈强酸性时, 镀液中的 WO_4^{2-} 会生成 H_2WO_4 沉淀而使镀液产生白色浑浊无法起镀。在化学镀 Ni-W-P 合金的过程中, pH 值的影响很大, 将镀液控制在不同的 pH 值, 可获得组成相差很大的 Ni-W-P 合金镀层^[21]。

镀液中, 在 Ni 原子的诱导下, W 原子与之产生共沉积, 同时 P 原子还原, 从而在基体表面产生 3 种元素的共沉积。Ni、W 和 P 3 种元素的原子沉积后, 迅速铺展, 形成一个圆形基元。

因此, 在施镀开始时, Ni 的沉积要优先于 W 和 P, 所得镀层中的 W 和 P 含量较低(即为图中较暗位置); 随着镀液中 Ni^{2+} 浓度的降低, 在 Ni 原子的诱导下, W 和 P 的沉积速度加快, 在镀层中其含量也随着增加(图中外围的明亮区域)。

3 结论

1) W 元素的共同沉积与 Ni 和 P 共同形成三元固溶体, 提高了镀层与基体部分的原子结合力, 并提高了镀层的硬度。铝合金表面化学镀 Ni-W-P 三元合金并经热处理后, 表面硬度较基体提高 10 倍以上, 磨损率仅是基体的十分之一, 镀层耐磨损性能随硬度提高而增加。

2) 过高的 W 含量使得化学镀 Ni-W-P 三元合金表面硬度下降, 同时磨损实验发现试样产生了镀层碎裂和剥落现象。这主要是由于铝合金基体与 Ni-W-P 镀层的热膨胀系数差别较大及 Ni_3P 析出而产生过大的应力, 故经 400 °C 加热 1 h 后, W 含量为 4.23% 及 P 为 5.26% 时, 化学镀 Ni-W-P 三元合金镀层的硬度较高, 耐磨损性较好, 但已有少量的剥离出现。随着 W 和 P 含量的增加, 经 400 °C 加热 1 h 后, 镀层的表面硬度和耐磨性下降。

3) 经 400 °C 保温 1 h 的化学镀 Ni-W-P 镀层磨损面的扫描电镜背散射图像及能谱分析表面镀层成分的分布是不均匀的, 主要原因是由于在沉积过程中, 在施镀开始时 Ni 的沉积要优先于 W 和 P 的沉积。

REFERENCES

- [1] LI Jun, HU Xin-guo, WANG Dian-long. Effects of codeposited tungsten on the properties of low-phosphorus electroless nickel coatings[J]. *Plating and Surface Finishing*, 1996, 83(8): 62-64.
- [2] Balaraju J N, Rajam K S. Electroless deposition of Ni-Cu-P, Ni-W-P and Ni-W-Cu-P alloys[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2005, 195(2/3): 154-161.
- [3] ZHANG Bang-wei, HU Wang-yu, QU Xuan-yuan, ZHANG Qing-long, ZHANG Heng, TAN Zhao-sheng. Preparation, formation and corrosion for Ni-W-P amorphous alloys by electroless plating[J]. *Transactions of the Institute of Metal Finishing*, 1996, 74(2): 69-71.

- [4] Gao Y, Zheng Z J, Zhu M, Luo C P. Corrosion resistance of electrolessly deposited Ni-P and Ni-W-P alloys with various structures[J]. Mater Sci Eng A, 2004, A381(1/2): 98-103.
- [5] Hamid Z A. Mechanism of electroless deposition of Ni-W-P alloys by adding surfactants[J]. Surface and Interface Analysis, 2003, 35(6): 496-501.
- [6] Koiwa I, Usuda M, Osaka T. Effect of heat-treatment on the structure and resistivity of electroless Ni-W-P alloy films[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1988, 135(5): 1222-1228.
- [7] Lima-Neto P D, Silva G P D, Correia A N. A comparative study of the physicochemical and electrochemical properties of Cr and Ni-W-P amorphous electrocoatings[J]. Electrochimica Acta, 2006, 51(23): 4928-4933.
- [8] Sai Y Y, Wu F B, Chen Y I, Peng P J, Duh J G, Tsai S Y. Thermal stability and mechanical properties of Ni-W-P electroless deposits[J]. Surface and Coatings Technology, 2001, 146(9/10): 146-147: 502-507
- [9] Chahal P, Tummala R R, Allen M G, White G E. Electroless Ni-P/Ni-W-P thin-film resistors for MCM-L based technologies[A]. IEEE. Proceedings - Electronic Components and Technology Conference[C]. Seattle WA USA: IEEE Piscataway NJ, USA, 1998: 232-239.
- [10] Balaraju J N, Jahan M, Rajam K S. Studies on autocatalytic deposition of ternary Ni-W-P alloys using nickel sulphamate bath[J]. Surface and Coatings Technology, 2006, 201(3/4): 507-512.
- [11] Aoki k, Takano O. Electrical resistance of electroless nickel-tungsten-phosphorus alloy deposits[J]. Plating and Surface Finishing, 1990, 77(3): 48-52.
- [12] XU Rui-dong, GUO Zhong-cheng, PAN Jun-yi. Corrosion resistance of electrodeposited RE-Ni-W-P-SiC-PTFE composite coating in phosphoric and ferric chloride[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2006, 16(3): 666-670.
- [13] El-Rehim S S A. Effect of additives on plating rate and bath stability of electroless deposition of nickel-phosphorus-boron on aluminum[J]. Metal Finishing, 1996, 94(12): 29-33.
- [14] 袁叔贵, 陈元彩, 邹政锋, 黄济元. 铝合金化学镀镍磷合金镀层的组织和相结构[J]. 金属热处理, 1996, 2: 16-20. YUAN Su-gui, CHEN Yuan-cai, ZOU Gan-feng, HUANG Ji-yuan. Microstructures of chemically deposited Ni-P coating on aluminium alloys[J]. Heat Treatment of Metals, 1996, 2: 16-20.
- [15] 郭忠诚, 翟大成, 朱晓云. 化学镀 Ni-P 合金在铝合金表面强化上的应用[C]//第五届全国化学镀会议. 北京: 中国腐蚀与保护协会, 2000: 93-97.
- GUO Zhong-cheng, ZHAI Da-cheng, ZHU Xiao-yu. Application of electroless plating Ni-P alloy in aluminium alloy[C]//The 5th China Electroless Plating Conference. Beijing: Chinese Society for Corrosion and Protection, 2000: 93-97.
- [16] 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.
- [17] HU Yong-jun, WANG Tian-xu, MENG Ji-long, RAO Qian-yang. Structure and phase transformation behaviour of electroless Ni-W-P on aluminum alloy[J]. Surface and Coating Technology, 2006, 201(3/4): 988-992.
- [18] 田 蔚. 金属物理性能[M]. 北京: 航空工业出版社, 1994. TIAN Shi. Physical Properties of Metal[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 1994.
- [19] 姜晓霞, 沈 伟. 化学镀理论及实践[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000. JIANG Xiao-xia, SHEN Wei. The Fundamental and Practice of Electroless Plating[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2000.
- [20] 高 岩. 华南理工大学博士学位论文[D]. 广州: 华南理工大学, 2005. GAO Yan. Dissertation of South China University of Technology[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2005.
- [21] 储召华, 郝桂霞, 李 君. 化学镀 Ni-W-P 三元合金工艺的研究[J]. 山东化工, 1998, 3: 5-7. CHU Zhao-hua, HAO Gui-xia, LI Jun. Study on the electroless technique of Ni-W-P ternary alloy[J]. Shandong Chemical Industry, 1998, 3: 5-7.
- [22] 陈钰秋, 陈克明. 化学镀 Ni-W-P 合金层镀覆工艺的研究[J]. 华中理工大学学报, 1998, 26(1): 104-106. CHEN Yu-qiu, CHEN Ke-ming. Investigation on the process of electroless plating of Ni-W-P alloy deposits[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 1998, 26(1): 104-106.
- [23] 周婉秋, 梁 平, 张 丽, 刘 鑫. 化学镀 Ni-W-P 三元合金的研究[J]. 沈阳师范学院学报(自然科学版), 2001, 19(1): 34-39. ZHOU Wan-qiu, LIANG Ping, ZHANG Li, LIU Xin. A study on chemical plating of nickel-tungsten-phosphorus ternary alloy[J]. Journal of Shenyang Normal University (Natural Science), 2001, 19(1): 34-39.

(编辑 李艳红)