



Ni-P 过渡层沉积时间和 PTFE 浓度对 Ni-P-PTFE 复合镀层的影响

董帅峰, 李 伟, 刘 平, 张 柯, 马凤仓, 刘新宽

(上海理工大学 材料科学与工程学院, 上海 200093)

摘 要: 通过控制化学镀 Ni-P 过程中的 Ni-P 层的沉积时间和 Ni-P-PTFE 镀液中 PTFE 的浓度, 利用电子扫描显微镜(SEM)、X 射线衍射仪(XRD)、纳米压痕仪、HSR-2M 摩擦磨损试验机对 Ni-P-PTFE 复合镀层的硬度和摩擦磨损性能进行表征, 研究化学镀过程中不同 Ni-P 过渡层沉积时间和 PTFE 浓度对 Ni-P-PTFE 复合镀层的硬度和摩擦性能的影响规律。结果表明: 当 Ni-P 过渡层沉积时间为 15 min, PTFE 浓度(体积分数)为 5%时, Ni-P-PTFE 复合镀层的表面光滑均匀, 与基体结合得更加紧密; Ni-P-PTFE 层最高硬度为 4.548 GPa, 最低摩擦因数为 0.145, 复合涂层的力学和摩擦性能达到最优。

关键词: Ni-P-PTFE 复合镀层; 化学镀; Ni-P 过渡层沉积时间; PTFE 浓度; 硬度; 摩擦性能

文章编号: 1004-0609(2018)-03-0579-07

中图分类号: TQ153.2

文献标志码: A

材料的摩擦与磨损均发生在材料表面, 因此改善机械零部件表面的摩擦性能是一种经济有效的技术手段。近几十年来, 表面技术作为一种改善材料表面性能的方法, 受到人们的日益关注。从材料表面的研究来看, 提高耐磨性能有两种途径: 一是研究具有良好机械特性的表面改性材料及工艺手段; 二是研究具有非金属性质的摩擦面(例如石墨、二硫化钼等)的摩擦磨损性能和应用方法。在力学性能的诸多指标中, 与摩擦磨损关系最密切的性能参数是硬度, 在大多数情况下磨损率都会随硬度的提高而降低, 目前对于提高材料表面硬度的研究已经取得了很多成果^[1]。从已有文献看, 与金属基或陶瓷基整体自润滑材料相比, 涂层材料具有制备工艺简单、成本低、适用于各种尺寸的工件等优点, 因而在材料的研究和开发中占有重要地位^[2]。目前, 将聚四氟乙烯(PTFE)微粒共沉积到化学镀 Ni-P 涂层中形成 Ni-P-PTFE 复合镀层是应用最广泛的减摩材料之一, PTFE 具有很好的化学稳定性、优异的不粘性以及耐高低温性能, 尤其是该材料与其他聚合物相比具有最低的摩擦因数(摩擦因数约为 0.05)而得到重视^[3-4]。由于 Ni-P-PTFE 固体润滑膜具有自润滑和减磨功能^[5], 大大提高了零部件的使用寿命

和整机的工作效率, 因此, 利用化学镀制备的 Ni-P-PTFE 复合镀层具有广泛的应用市场。

在本研究领域, 已有一些学者对 Ni-P-PTFE 复合镀层的制备工艺做过研究。例如, 刘学忠等^[6]用化学镀技术在碳钢表面制备 Ni-P 及 Ni-P-PTFE 纳米非晶镀层。张庆乐等^[7]研究镀液中活性剂和 PTFE(聚四氟乙烯)含量对复合镀层中 PTFE 含量、涂层的沉积速率的影响。付传起等^[8]研究表面活性剂和纳米 PTFE 对 Ni-P-PTFE 镀层力学和摩擦学性能的影响。从 Ni-P-PTFE 复合镀层的研究现状来看, Ni-P-PTFE 复合镀层沉积前的 Ni-P 过渡层厚度对 Ni-P-PTFE 复合镀层的结构与后续沉积具有较大的影响, 化学镀液中的 PTFE 浓度同样决定着 Ni-P-PTFE 复合镀层的力学和摩擦磨损性能。然而, 目前文献针对 Ni-P 过渡层沉积时间和 PTFE 浓度对 Ni-P-PTFE 复合镀层的影响并未有统一的看法。因此, 基于以上的研究背景, 本文作者结合化学镀 Ni-P-PTFE 复合镀层工艺过程中的不同 Ni-P 层的沉积时间和 Ni-P-PTFE 镀液中不同的 PTFE 浓度对 Ni-P-PTFE 复合镀层的微观结构、力学和摩擦性能的影响进行系统研究。

1 实验

1.1 试验工艺流程

实验采用 70 黄铜(Cu 含量为 70%(质量分数), 杂质含量小于 0.3%, 余量为 Zn)作为化学复合镀基材, 基材尺寸规格是 20 mm×30 mm×1 mm, 首先在黄铜基体化学镀 Ni-P 层, 然后化学镀 Ni-P-PTFE 复合镀层。在黄铜基材表面化学镀 Ni-P、Ni-P-PTFE 双涂层的实验工艺如下: 打磨试样、抛光→热水冲洗(60~80 ℃)→有机除油加超声清洗 10 min→冷水清洗 1 min→化学除油 10 min→热水冲洗(60~80 ℃)→将试样放入 50%(体积)的盐酸中常温酸洗活化 5 min→热水冲洗(60~80 ℃)→将试样迅速放入加热到预定温度的 Ni-P 镀液中(在放入试样后, 用体积相同大小的干净铁片靠近铜片试样)→完成后, 迅速放入 Ni-P-PTFE 镀液中进行化学镀→完成后, 取出用热水冲洗 2 min, 烘干保存。施镀过程中, 使用磁力带芯间歇搅拌(搅拌 2 min, 停留 8 min), 注意控制搅拌速度, 保持镀液干净透明, 并且没有沉淀和分解现象。定时检测镀液的 pH 值和主盐成分, 使 pH 值始终保持在 4.8 左右, 并及时补充镀液主盐成分, 保证镀液成分含量在设定范围内。

1.2 镀液的配方

Ni-P 镀液与 Ni-P-PTFE 化学镀液的具体配方如表 1 所列。

表 1 Ni-P 镀液与 Ni-P-PTFE 化学镀液的配方

Table 1 Recipe of Ni-P and Ni-P-PTFE electroless plating solution

Composition and condition	Pre-nickel plating bath	Electroless plating Ni-P-PTFE solution
$\rho(\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O})/(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	27	27
$\rho(\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O})/(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	25	25
$\rho(\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 6\text{H}_2\text{O})/(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	8	8
$\rho(\text{Lactic acid})/(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	17	17
$\rho(\text{Stabilizer})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	2	2
$\rho(\text{Buffer})/(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	10	10
pH	4.8	4.8
PTFE emulsion/mL	—	10~70
Temperature/℃	90	80

1.3 Ni-P-PTFE 复合镀层的表征和测试

Ni-P-PTFE 复合镀层的物相分析在 D8 Advance 型 X 射线多晶衍射仪(德国 Bruker 公司)上进行, 采用 Cu K α 辐射($\lambda=0.15406$ nm), 测量范围为 10°~70°; 表面形貌的显微组织表征所采用是 FEI 公司的 Quanta FEG450 型场发射环境扫描电子显微镜(美国 FEI 公司); 薄膜的硬度测量采用 NANO Indenter G200 型纳米压痕仪(美国 Agilent 公司), 采用 Berkovich 压头, 通过精确记录压入深度随载荷的变化, 得到加载-卸载曲线, 用 Oliver-Pharr 模型^[9]计算出材料的硬度和弹性模量, 薄膜的压入测量深度约为 400 nm, 该深度小于薄膜厚度的 1/10 以消除基底对薄膜硬度的影响, 每个样品测量 16 个点, 取变异系数在 10%以内的数据平均值为最终的硬度值; Ni-P-PTFE 复合镀层的摩擦因数测试是在 HSR-2M 往复摩擦磨损试验机(兰州中科凯华科技开发有限公司)上进行, 加载载荷为 40 N, 往复频率为 5 Hz, 摩擦长度为 8 mm、摩擦副材料为 d 3 mm 的轴承钢球。

2 结果与讨论

2.1 不同的 Ni-P 层的沉积时间对 Ni-P-PTFE 复合镀层的影响

由于 PTFE 颗粒的加入会导致 Ni-P-PTFE 复合镀层的结合强度下降, 因此在黄铜基材与 Ni-P-PTFE 复合镀层之间插入一层 Ni-P 层作为过渡层以提升涂层与基材的结合强度。在 Ni-P-PTFE 复合镀层的服役过程中, 不同沉积时间的 Ni-P 过渡层对 Ni-P-PTFE 复合镀层的服役性能有着重要的影响, 过渡层的沉积时间长短直接影响后续 Ni-P-PTFE 层的沉积质量, 本部分固定 Ni-P-PTFE 镀液中 PTFE 浓度(体积分数)为 4%, 选取化学镀 Ni-P 过程中 Ni-P 层的沉积时间分别为 5、10、15、20 和 25 min, 制备出具备不同沉积时间的 Ni-P 过渡层的 Ni-P-PTFE 复合镀层, 研究不同沉积时间下的 Ni-P 层对 Ni-P-PTFE 复合镀层的硬度和摩擦性能影响。

首先研究不同 Ni-P 层沉积时间对 Ni-P-PTFE 复合镀层的厚度的影响, 如表 2 和图 1 所示。

由表 2 和图 2 可见, 如将 Ni-P-PTFE 的沉积时间控制在 30 min, 随着 Ni-P 层的沉积时间由 5 min 增加到 25 min, Ni-P 层的厚度在不断变大, 而 Ni-P-PTFE 层的厚度呈现先增大后减小的趋势。Ni-P-PTFE 层的沉积厚度出现如此变化的原因是: 当 Ni-P 层沉积时间过短(5 min)时, 获得的 Ni-P 层比较薄且不均匀,

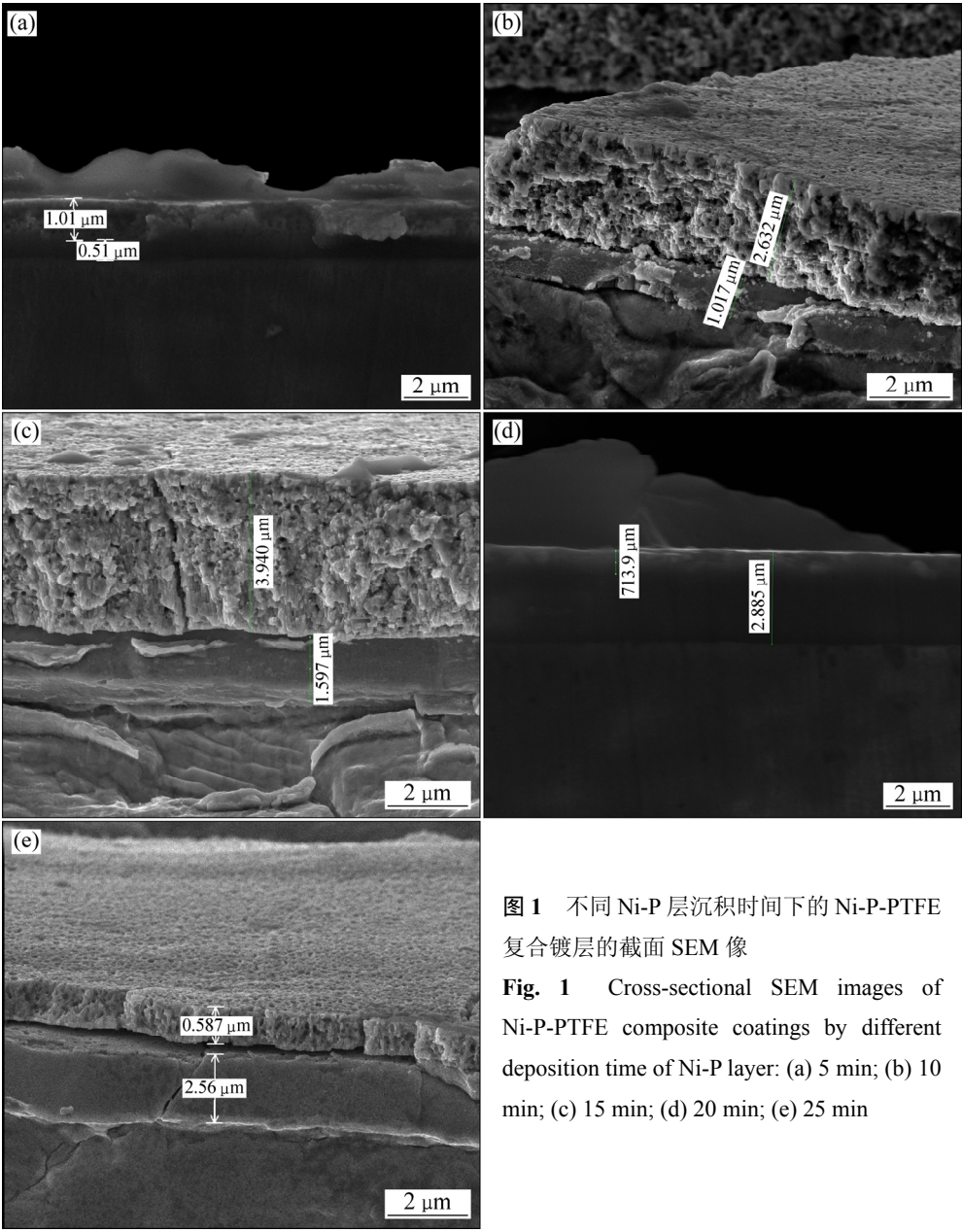


图 1 不同 Ni-P 层沉积时间下的 Ni-P-PTFE 复合镀层的截面 SEM 像

Fig. 1 Cross-sectional SEM images of Ni-P-PTFE composite coatings by different deposition time of Ni-P layer: (a) 5 min; (b) 10 min; (c) 15 min; (d) 20 min; (e) 25 min

表 2 不同 Ni-P 层沉积时间下的 Ni-P 层与 Ni-P-PTFE 复合镀层的厚度

Table 2 Thickness of Ni-P layer and Ni-P-PTFE layer by different deposition time of Ni-P layer

Deposition time of Ni-P layer/min	Thickness of Ni-P / μm	Thickness of Ni-P-PTFE/ μm
5	0.619	1.100
10	1.017	2.682
15	1.597	3.940
20	2.171	0.714
25	2.56	0.587

使得形成 Ni-P 层的晶粒排列不够紧密^[10],但随着沉积时间的延长(10~15 min), Ni-P 层将更有机会达到厚度均匀的状态;在沉积时间为 15 min,即 Ni-P 厚度为 1.597 μm 时, Ni-P 层的厚度达到最佳状态,组织晶粒结构愈加紧致细密^[11],为 Ni-P 层后的化学镀 Ni-P-PTFE 提供了良好的沉积条件,使 Ni-P-PTFE 复合镀层能更好地沉积在 Ni-P 层上, PTFE 颗粒均匀地分布在 Ni-P-PTFE 复合镀层中,因此复合镀层的沉积厚度不断增加。但是如果沉积时间过长(20~25 min)时,镀液本身的质量由于消耗而下降,导致部分组织颗粒粗化, Ni-P 层表面的各处的能量值不一致^[12-13],导致化学镀 Ni-P-PTFE 的沉积条件变差,使 Ni-P-PTFE 层

难以持续形成,从而使 Ni-P-PTFE 复合镀层的厚度开始下降,同时会造成 Ni-P-PTFE 复合镀层的晶粒大小不一致、结构稀疏、晶粒之间的间隙变大等缺陷,这也将对 Ni-P-PTFE 复合镀层的服役性能造成不利影响。

接下来,通过对不同 Ni-P 层沉积时间下的 Ni-P-PTFE 复合镀层的摩擦因数和硬度变化曲线的分析,研究 Ni-P 层厚度对 Ni-P-PTFE 复合镀层的硬度和摩擦性能的具体影响,如图 2 所示。

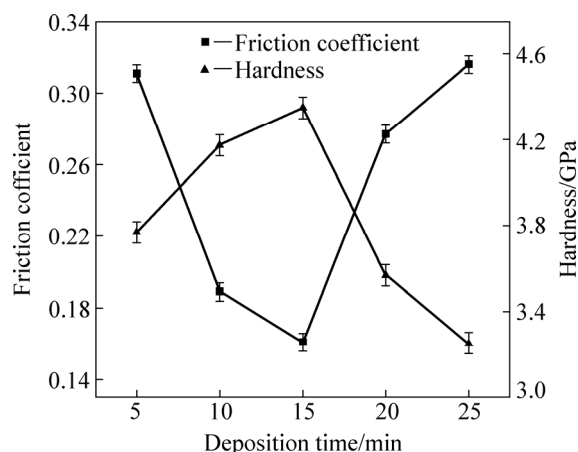


图 2 不同 Ni-P 层沉积时间下的 Ni-P-PTFE 复合镀层的摩擦因数和硬度变化曲线图

Fig. 2 Variation of friction coefficient and hardness of Ni-P-PTFE composite coating on deposition time of Ni-P layer

由图 2 可见,随着 Ni-P 层的沉积时间的增加, Ni-P-PTFE 复合镀层的摩擦因数和硬度呈现规律性的变化。

根据图 1 可以分析 Ni-P-PTFE 复合镀层的摩擦性能受 Ni-P 层的沉积时间变化的影响关系。首先,当 Ni-P 层的沉积时间从 5 min 增加到 15 min,即 Ni-P 层厚度从 0.619 μm 增大到 1.597 μm 时, Ni-P 层的厚度逐渐达到一个均匀致密的状态,如图 1(a)、(b)、(c)所示,有利于 Ni-P-PTFE 复合镀层的沉积,使 PTFE 颗粒可被均匀地被包裹在网状孔结构中,均匀分散开, Ni-P-PTFE 复合镀层的网状分布也更均匀致密。因此,当 Ni-P 层的沉积时间为 15 min 时,复合镀层的硬度获得最大值为 4.348 GPa,摩擦因数获得最小值为 0.161, Ni-P-PTFE 复合镀层的自润滑性能最好。随着 Ni-P 层的沉积时间由 20 min 增加至 25 min,即从 1.597 μm 增大到 3.310 μm 时,如图 1(d)、(e)所示,由于晶粒的大小不一致,造成 Ni-P-PTFE 复合镀层的网状空洞结构大小不一致,结构稀疏,使得 Ni-P-PTFE 复合镀层的硬度随之降低。当涂层表面与物体面接触时,

由于镀层硬度低,表面易被磨损,涂层被挤压出来的 PTFE 润滑颗粒大小不一致,不能均匀地分布在接触面,导致涂层的耐磨性变差,从而使得 Ni-P-PTFE 复合镀层的自润滑性能大大下降。

2.2 不同 PTFE 浓度对 Ni-P-PTFE 复合镀层的影响

化学镀液中的 PTFE 浓度对 Ni-P-PTFE 复合镀层的沉积以及结构性能具有重要的影响。在确定最佳的过渡层 Ni-P 层厚度为 1.597 μm 的前提下,本试验在 Ni-P-PTFE 镀液中添加不同浓度的 PTFE 乳液,研究不同的 PTFE 浓度对 Ni-P-PTFE 复合镀层的结构与摩擦性能的影响。分别选取 10、30、50 和 70 mL 的 PTFE 乳液,将其加入并配比成总量为 1000 mL 的 Ni-P-PTFE 镀液,通过化学镀得到 PTFE 浓度分别为 1%、2%、5%和 7%下的 Ni-P-PTFE 复合镀层。

首先研究不同 PTFE 浓度对 Ni-P-PTFE 复合镀层的微观结构的影响,如图 3 所示。

通过观察可见,随着 PTFE 浓度增加,PTFE 颗粒逐渐增多,在 PTFE 浓度为 5%使涂层表面的 PTFE 颗粒最多,从 5%增加到 7%时,PTFE 颗粒又逐渐减少。Ni-P-PTFE 复合镀层是一种网状孔结构, Ni-P 合金涂层形成一种网状孔, PTFE 颗粒被包裹在 Ni-P 合金涂层网状孔中^[14]。因此,随着 PTFE 浓度增加, PTFE 颗粒在复合镀层中分布更均匀,颗粒形状更加细小,复合镀层表面的网状孔的分布均匀致密,在 PTFE 浓度为 5%时,复合镀层中 PTFE 颗粒的分布状态达到最佳。当 PTFE 浓度进一步增大时,复合镀层网状孔结构包裹的 PTFE 颗粒分布变得不均匀,形状大小差异比较大,某些位置出现团聚的现象^[15],形成的网状孔也分布比较稀疏。

接下来,通过对不同 PTFE 浓度下的 Ni-P-PTFE 复合镀层的硬度和摩擦因数曲线的分析,如图 4 所示,进一步研究不同 PTFE 浓度对 Ni-P-PTFE 复合镀层的硬度和摩擦性能的具体影响。

随着 PTFE 浓度的增加,复合镀层的硬度呈现先减小后增加,再减小的趋势,在 PTFE 浓度为 1%时,达到最大 4.908 GPa。而复合镀层的摩擦因数则呈现先减小后增大的趋势,在 PTFE 浓度为 5%时,摩擦因数达到最小为 0.145。结合图 3 分析可得,随着 PTFE 浓度的增加,使 PTFE 颗粒在复合镀层中分散更广,容积率增大,使得复合镀层表面 Ni-P 合金的有效面积减小^[16]。因此,随着 PTFE 浓度的增加, Ni-P-PTFE 复合镀层的硬度总体呈下降趋势。而当 PTFE 浓度从 3%增加到 5%,复合镀层所形成的网状孔结构更加细小致密, PTFE 颗粒分布得更均匀,当复合镀层与物体

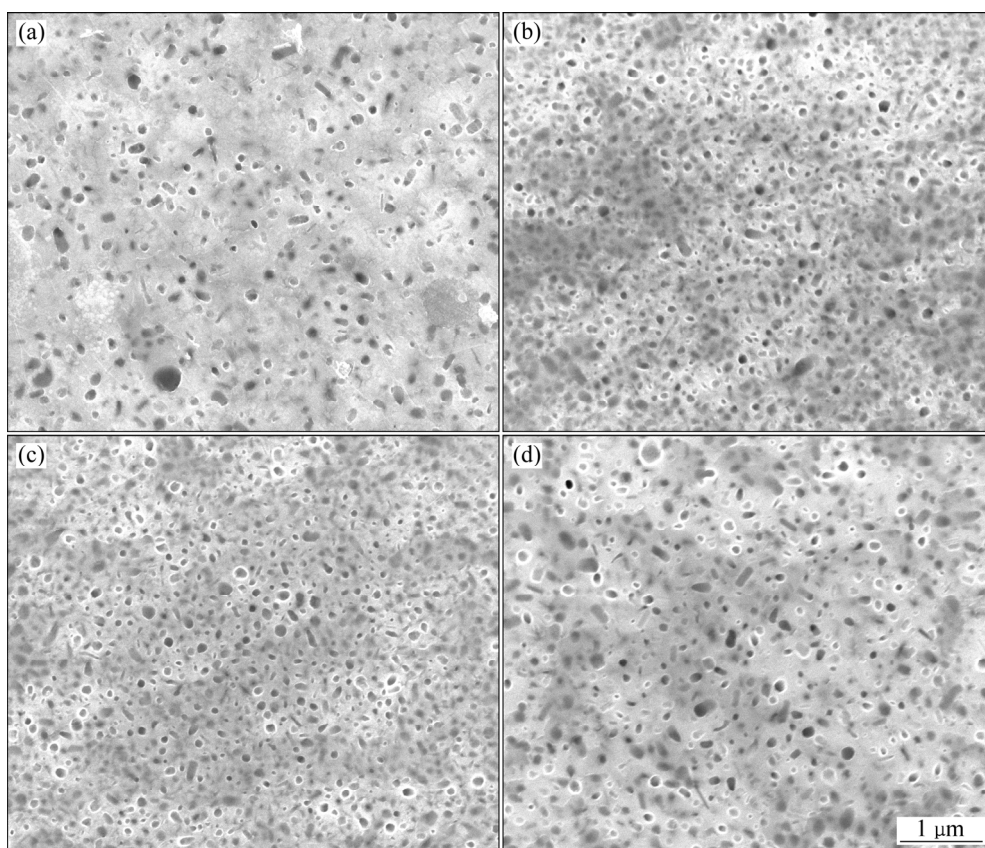


图 3 不同 PTFE 浓度下的 Ni-P-PTFE 复合镀层表面形貌

Fig. 3 Surface morphologies of Ni-P-PTFE composite coating deposited by different PTFE concentrations: (a) 1%; (b) 3%; (c) 5%; (d) 7%

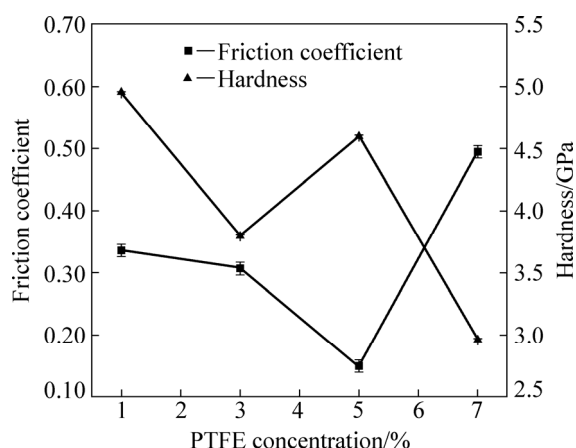


图 4 不同 PTFE 浓度下的 Ni-P-PTFE 复合镀层的硬度和摩擦因数曲线

Fig. 4 Variation of friction coefficient and hardness of Ni-P-PTFE composite coating on PTFE concentration

表面发生摩擦时, PTFE 颗粒更加容易被挤出表层, 形成均匀的润滑膜, 从而大大提升复合镀层的摩擦磨损性能。同时, 由于 PTFE 颗粒是包裹在网状孔中,

所以与施加力的物理接触面积较小, 承受载荷主要还是 Ni-P 合金涂层表面, 所以硬度略显升高至 4.548 GPa。当 PTFE 浓度从 5% 增加到 7% 时, 复合镀层网状孔结构所包裹的 PTFE 颗粒分布变得不均匀, 形状大小差异比较大, 出现一定量地团聚现象, 形成的网状孔也分布稀疏, 大小不一致, 所以在摩擦时, 被“挤压”出来的 PTFE 颗粒的不易形成均匀的润滑膜, 最后造成复合镀层表面的自润滑性能降低, 摩擦磨损性能明显下降, 同时使得 Ni-P-PTFE 复合镀层的硬度降低的比较明显。

3 结论

1) 当 Ni-P-PTFE 浓度一定时, Ni-P-PTFE 复合镀层的硬度和摩擦性能会随着 Ni-P 过渡层的沉积时间变化而发生变化, 当 Ni-P 层的沉积时间为 15 min 时, Ni-P-PTFE 复合镀层的硬度和自润滑性能达到最优, 其摩擦因数和硬度分别为 0.161 和 4.348 GPa。

2) 控制 Ni-P 过渡层的沉积时间为 15 min, 随着 PTFE 浓度的增加, 复合镀层的硬度呈现先减小后增加, 再减小的趋势; 而复合镀层的摩擦因数则呈现先减小后增大的趋势, 在 PTFE 浓度为 5% 时, Ni-P-PTFE 复合镀层的硬度达 4.548 GPa, 摩擦因数达到最小为 0.145。

3) 通过对 Ni-P、Ni-P-PTFE 双层复合镀层的化学镀工艺优化, 当化学镀 Ni-P 过渡层的沉积时间为 15 min, Ni-P-PTFE 镀液中 PTFE 浓度为 5% 时, 通过化学镀得到 Ni-P、Ni-P-PTFE 双层复合镀层, 其表层 Ni-P-PTFE 复合镀层自润滑性能达到最优。

REFERENCES

- [1] 刘庆纲, 李德春, 王战, 胡小东, 胡小唐, 清野慧. 材料表面硬度及形状的 AFM 分析方法[J]. 天津大学学报, 2003, 36(2): 10-11.
LIU Qing-gang, LI De-chun, WANG Zhan, HU Xiao-dong, HU Xiao-tang, QING Ye-hui. AFM analysis method for surface hardness and shape of materials[J]. Journal of Tianjin University, 2003, 36(2): 10-11.
- [2] HULTMAN L, NEIDHARDT J, HELLGREN N, RAPOPORT L, LESHCHINSKY V, YU V. Modification of contact surfaces by fuller ene-like solid lubricant Na particles[J]. Surface and Coatings Technology, 2003, 54(7): 13-14.
- [3] EBDON P R. Composite coatings with lubricating properties[J]. Transactions of the Institute of Metal Finishing, 1987, 65(5): 80-82.
- [4] HADLEY J S, HARLAND L E. Electroless nickel-PTFE composite coatings[J]. Metal Finishing, 2007, 85(12): 51-53.
- [5] ZHAO F, FRANZ S, VICENZO A, CAVALLOTTI P L, SANSOTER A M, NAVARRINI W. Electro-deposition of nano-structured columnar cobalt for self-lubricant coatings[J]. Electrochimica Acta, 2011, 56(26): 141-145.
- [6] 刘学忠, 李超, 王建飞, 田进涛, 尹衍升. 碳钢表面制备 Ni-P 及 Ni-P-PTFE 纳米非晶镀层研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2010, 30(5): 8-10.
LIU Xue-zhong, LI Chao, WANG Jian-fei, TIAN Jin-tao, YIN Yan-sheng. Study on Preparation of Ni-P and Ni-P-PTFE nano amorphous coatings on carbon steel[J]. Chinese Journal of Corrosion and Protection, 2010, 30(5): 8-10.
- [7] 张庆乐, 付传起, 苏宝华, 杨萍, 王宙. 镀液活性剂和 PTFE 含量对 Ni-P-PTFE 复合镀层防垢性能的影响[J]. 表面技术, 2014, 43(1): 86-89.
ZHANG Qing-le, FU Chuan-qi, SU Bao-hua, YANG Ping, WANG Zhou. Effect of the surfactant and PTFE content in plating solution on the antifouling properties of Ni-P-PTFE composite coating[J]. Surface Technology, 2014, 43(1): 86-89.
- [8] 付传起, 王宙, 李斌. 表面活性剂和纳米 PTFE 对 Ni-P-PTFE 镀层力学和摩擦学性能的影响[J]. 表面技术, 2010, 39(6): 13-15, 25.
FU Chuan-qi, WANG Zhou, LI Bing. Effects of surfactant and nano PTFE on the mechanical and tribological properties of Ni-P-PTFE coatings[J]. Surface Technology, 2010, 39(6): 13-15, 25.
- [9] DISERENS M, PATSCHEREIDER J, LEVY F. Improving the properties of titanium nitride by incorporation of silicon[J]. Surface and Coatings Technology, 1998, 108(8): 241-246.
- [10] 孔德军, 付贵忠. 5052 铝合金表面化学镀 Ni-P 镀层的组织与性能[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(5): 1360-1364.
KONG De-jun, FU Gui-zhong. Microstructure and properties of Ni-P coatings prepared by chemical plating on surface of 5052 aluminium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(5): 1360-1364.
- [11] ZHU Cheng-yi, LI Guang-qiang, QIN Qing-wei, MA Guo-jun. Thermodynamic principle and properties of electroplated RE-Ni-W-P-B4C composite coatings[J]. International Conference of Nonferrous Materials, 2007, 17: s878-s885.
- [12] 谢治辉, 余刚. 电镀时间对化学镀镍液阻抗谱及镀层表面形貌的影响[J]. 材料导报, 2014, 28(24): 446-448.
XIE Zhi-hui, YU Gang. Effect of plating time on the impedance spectra and surface morphology of electroless nickel plating[J]. Materials Review, 2014, 28(24): 446-448.
- [13] SHANG S Z. Influence of deposition time on electroless nickel plating on magnesium alloy surface[J]. Surface Technology, 2009, 38(6): 73-74.
- [14] 周啸, 杜文义. Ni-P-PTFE 化学复合镀层的组成与结构[J]. 材料学报, 2009, 45(3): 2-3.
ZHOU Xiao, DU Wen-yi. Composition and structure of electroless Ni-P-PTFE composite coatings[J]. Journal of Materials Science, 2009, 45(3): 2-3.
- [15] 吕莹, 张治安, 赖延清, 刘业翔. 室温下多孔 $Mg(OH)_2$ 薄膜的电沉积制备及表征[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(4): 1086-1091.
LÜ Ying, ZHANG Zhi-an, LAI Yan-qing, LIU Ye-xiang. Preparation and characterization of electrodeposited porous $Mg(OH)_2$ thin films at room temperature[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(4): 1086-1091.
- [16] 吕鏢, 胡振峰. 电流密度对镍镀层结构和性能的影响[J]. 中国表面工程, 2013, 26(4): 6-7.
LÜ Biao, HU Zhen-feng. Effect of current density on the structure and properties of nickel coatings[J]. China Surface Engineering, 2013, 26(4): 6-7.

Effects of Ni-P deposition time and PTFE concentration on Ni-P-PTFE composite coatings

DONG Shuai-feng, LI Wei, LIU Ping, ZHANG Ke, MA Feng-cang, LIU Xin-kuan, CHEN Xiao-hong, HE Dai-hua

(School of Materials Science and Engineering,

University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In order to study the influence of Ni-P deposition time and PTFE concentration on the hardness and friction property of Ni-P-PTFE composite coating, by controlling the deposition time of Ni-P and the concentration of PTFE, the hardness and friction property of Ni-P-PTFE composite coating were characterized by scanning electron microscopy (SEM), X-ray diffraction (XRD), Nano Indenter and HSR-2M friction wear testing machine. The results show that when the deposition time of Ni-P transition layer is 15 min and the PTFE concentration (volume fraction) is 5%, the Ni-P-PTFE composite coating can achieve the smooth and uniform microstructure, and the strong bond force with substrate, together with the highest hardness of 4.548 GPa and the lowest friction coefficient of 0.145. Both mechanical property of the composite coating and lubrication property are the best.

Key words: Ni-P-PTFE composite coating; electroless; Ni-P deposition time; PTFE concentration; hardness; friction property

Foundation item: Project(51471110) supported by the National Natural Science Foundation of China

Received date: 2016-11-29; **Accepted date:** 2017-05-02

Corresponding author: LI Wei; Tel: +86-21-55271682; E-mail: liwei176@usst.edu.cn

(编辑 何学锋)