

镁合金表面化学镀 Ni-P 和 Ni-P-SiC 的对比

沟引宁, 黄伟九, 朱翊

(重庆理工大学 材料科学与工程学院, 重庆 400054)

摘要: 目的 提高镁合金的耐磨性、耐蚀性, 扩大其应用领域。方法 采用“磷酸+钼酸铵酸洗→HF 活化”的方法进行前处理, 直接在 AZ91D 镁合金表面化学镀 Ni-P 合金镀层和 Ni-P-SiC 复合镀层。对两种镀层的表面和截面形貌、成分、结构、硬度、耐蚀性及耐磨性进行了系统比较。结果 在 Ni-P 合金镀层中引入 SiC 粉末后, 镀层的胞状颗粒细化, 硬度提高至 643HV, 但其腐蚀电流密度有所增大。结论 与 Ni-P 合金镀层相比, Ni-P-SiC 复合镀层的耐蚀性有所下降, 但耐磨性能大大提高。

关键词: 镁合金; 化学镀; Ni-P; Ni-P-SiC; 耐蚀性; 耐磨性

中图分类号: TQ153.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2014)01-0016-05

Comparative Study of Electroless Ni-P and Ni-P-SiC on AZ91D Magnesium Alloy

GOU Yin-ning, HUANG Wei-jiu, ZHU Yi

(College of Materials Science and Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

ABSTRACT: **Objective** To improve the corrosion resistance and wear resistance of AZ91D magnesium alloy. **Methods** Ni-P-SiC composite coating and Ni-P coating were directly fabricated by electroless plating using phosphoric acid + ammonium molybdate pickling and HF activation. For comparison, electroless Ni-P coating was prepared at the same time. The morphology, composition, structure, hardness, corrosion resistance and wear resistance of the two coatings were compared systematically. **Results** The cellular grains of coating were refined by adding SiC powder. SiC phase appeared in the Ni-P-SiC composite coating without changing the basic structure of Ni-P alloy. The hardness of the Ni-P-SiC composite coating reached up to 643HV. The corrosion current density increased slightly in terms of the Ni-P alloy coating. **Conclusion** Compared with the Ni-P coating, the corrosion resistance of the Ni-P-SiC composite coating declined slightly, but its wear resistance increased greatly.

KEY WORDS: magnesium alloy; electroless plating; Ni-P; Ni-P-SiC; corrosion resistance; wear resistance

镁及其合金具有优异的物理性能及机械性能, 在许多领域具有广泛的应用前景^[1-3], 但是耐蚀性、耐磨性较差大大限制了其在服役条件较为苛刻的汽车工业和航空领域的应用^[4-7]。

化学镀是工业上应用广泛的涂层技术之一, 但镁

合金具有极低的电极电位, 且表面电势不均, 因此难以施镀。在镁合金表面进行化学镀通常需先浸锌, 这不但会增加成本和工艺复杂性, 而且使用氰化物还会产生安全和废液处理问题^[8]。化学复合镀技术可获得各种不同性质的镀层, 因而得到广泛关注。目前,

收稿日期: 2013-08-05; 修订日期: 2013-10-14

Received: 2013-08-05; Revised: 2013-10-14

基金项目: 重庆市教委科技研究项目(KJ070602)

Fund: Supported by the Chongqing Commission Sci. & Tech. Project (KJ070602)

作者简介: 沟引宁(1977—), 女, 陕西华县人, 博士, 讲师, 主要从事材料表面工程的教学和研究。

Biography: GOU Yin-ning (1977—), Female, from Huaxian, Shaanxi, Ph. D., Lecturer, Mainly engaged in teaching and research work on materials surface engineering.

国内外主要研究的是以 SiC , Al_2O_3 等超硬颗粒为共沉积微粒的复合镀层^[9-11], 其硬度高, 耐磨性能优异, 应用前景十分广阔^[12]。大多数研究者通过在镀液中添加纳米颗粒来增强镁合金的性能, 但是纳米颗粒易团聚, 如果前处理不当, 将会导致其在镀层中分布不均匀以及团聚加剧等, 使得镀层的耐蚀性和耐磨性下降^[13-14]。

文中选用成本低的硫酸镍为主盐, 采用“磷酸+钼酸铵酸洗→HF 活化”的方法进行前处理, 在 AZ91D 镁合金表面直接化学镀制备 Ni-P 合金层, 并通过在镀液中加入微米 SiC 颗粒, 获得 Ni-P-SiC 复合镀层, 以期提高镁合金的耐磨性能。通过对 Ni-P-SiC 复合镀层与 Ni-P 镀层进行系统比较, 探讨 SiC 硬质颗粒对 Ni-P 合金耐磨性能的改善机理。

1 实验

1.1 材料

基体材料 AZ91D 镁合金的化学组成(以质量分数计)为: 9.1% Al, 0.6% Zn, 0.2% Mn, 余量为 Mg。试样尺寸为 20 mm×10 mm×10 mm, 先用 400#, 600#, 800#, 1000#, 1200#砂纸依次打磨, 经冷水冲洗、无水乙醇脱水、吹干后, 备用。

复合化学镀镀液中添加的固体颗粒为 f2000 型 SiC 微米颗粒, 粒径为 1~2 μm 。 SiC 微粒加入镀液前, 先用盐酸浸泡, 以去除其中的金属杂质, 再用蒸馏水清洗至中性, 用乙醇脱水, 烘干, 备用。

1.2 施镀

化学镀的工艺流程为: 砂纸打磨→碱洗→酸洗→活化→化学镀。碱洗除油采用 60 g/L NaOH +15 g/L $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ 溶液, 在 60 ℃下清洗 10 min。酸洗采用环保酸洗液, 即 20 mL/L H_3PO_4 +5 g/L 钼酸铵溶液, 在室温下清洗 10 s。活化是在 40% (质量分数) HF 溶液中浸泡 8~10 min。

Ni-P 合金化学镀的镀液配方为: 25 g/L $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, 30 g/L $\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$, 15 mL/L 乳酸, 15 g/L 柠檬酸, 20 g/L 乙酸钠, 15 mL/L HF (质量分数为 40%), 10 g/L NH_4HF_2 , 稳定剂适量。用浓氨水调镀液 pH 至 6.0, 施镀温度为 (85±2) ℃, 施镀时间 1 h。

Ni-P-SiC 复合镀是在上述镀液中添加 2 g/L SiC 和 60 mg/L 复合表面活性剂, 用浓氨水调镀液 pH 至

5.0。在施镀过程中, 通过磁力器搅拌使 SiC 颗粒始终悬浮在镀液中, 施镀温度为 80 ℃, 施镀时间为 1 h。

1.3 镀层性能测试

采用 JOEL JSM-6460LV 型扫描电镜观察镀层的表面及截面形貌, 并用附带的能谱仪(EDX)测定镀层的化学成分。采用 BDX3300 型 X 射线衍射仪分析镀层的结构。

用 EG & G 273 电化学测试系统检测镀层在室温下的耐腐蚀性能, 腐蚀介质为 3.5% (质量分数) 的 NaCl 溶液。采用标准三电极系统, 饱和甘汞电极为参比电极, 铂电极为辅助电极, 工作电极为暴露面积 1 cm^2 的试样(包括裸镁合金及两种镀层试样)。试样在腐蚀介质中浸泡 30 min 后开始进行极化曲线测试, 扫描速度设为 0.5 mV/s。

利用 HVX-1000 型显微硬度计测试镁合金基体及镀层的硬度, 加载载荷为 1.96 N。裸镁合金及两种镀层的摩擦磨损性能在 CSEM 型摩擦磨损试验机(瑞士)上测试, 采用 $\phi 6$ mm 的 GCr15 钢球作为偶件材料, 滑动速度为 3 cm/s, 载荷为 0.49 N, 磨损半径为 4 mm。摩擦磨损实验完成后, 在扫描电子显微镜下观察试样的磨痕形貌。

2 结果与讨论

2.1 镀层的形貌与成分

图 1 为 Ni-P 镀层和 Ni-P-SiC 复合镀层的表面形貌, 可见二者均呈现致密的胞状结构, 胞与胞之间由较平直的界面连接, 且胞与胞之间结合较紧密。与 Ni-P 镀层相比, Ni-P-SiC 复合镀层表面的胞状凸起物更为细小均匀, 表面可见一些没有被镀层完全包覆的 SiC 微粒和一些由于 SiC 脱落而留下的凹坑。由此可见, 不溶性 SiC 微粒的加入可以细化镀层组织, 使得镀层的结构更加均匀。

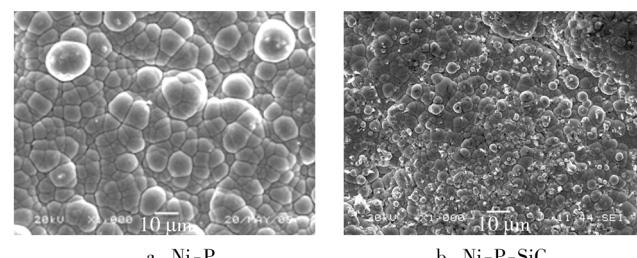


图 1 镀层的表面形貌

Fig. 1 surface photographs of the coatings

图 2 给出了两种镀层表面的能谱分析结果。可见, Ni-P 镀层表面主要由 Ni 和 P 组成; Ni-P-SiC 复合镀层表面除了 Ni 和 P 之外, 还含有 Si 元素, Si 元素必然来自于第二相不溶性粒子 SiC, 由此可知, SiC 存在于复合镀层中。能谱分析表明, 复合镀层中 P 的质量分数为 11.96%, Ni 的质量分数为 83.10%, Si 的质量分数为 4.95%。

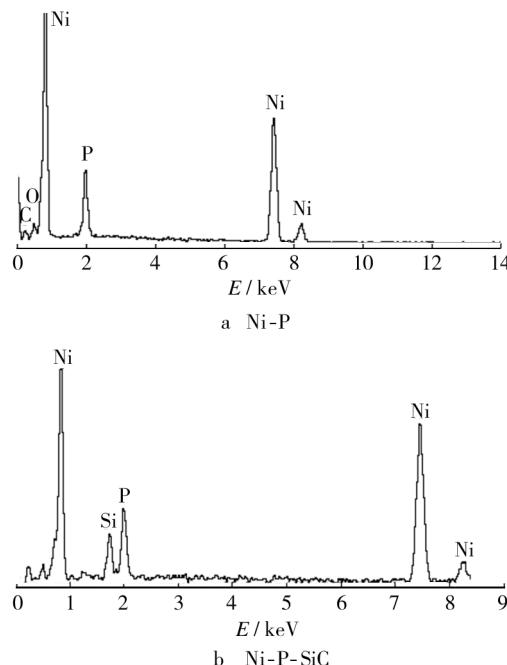


图 2 镀层表面化学成分

Fig. 2 Chemical composition of the coatings

为了了解镀层与基体的界面结合情况, 采用扫描电镜对镀层的横截面形貌进行观察。如图 3 所示, 化学镀 Ni-P 镀层和 Ni-P-SiC 复合镀层均与镁合金基体结合良好, 镀层内部比较均匀致密, 无明显缺陷。与 Ni-P 镀层(厚度 30 μm)相比, 在相同的沉积时间内, Ni-P-SiC 复合镀层因 SiC 颗粒的冲刷, 厚度有所降低(22 μm), 内部出现了均匀分布的 SiC 颗粒, 黑色的 SiC 颗粒以基底金属为“骨架”, 牢牢地嵌合在其中。由于

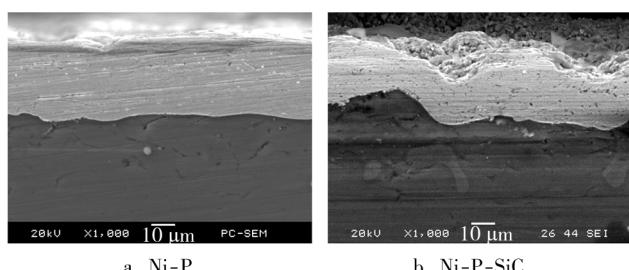


图 3 镀层的截面形貌

Fig. 3 Cross-section SEM photographs of the samples

化学镀的温度较低, 因此 SiC 微粒基本上只能以机械嵌合的方式存在于镀层中, 导致镀层中缺陷增多。

2.2 镀层的结构

Ni-P 镀层和 Ni-P-SiC 复合镀层的 XRD 衍射图谱见图 4。两种镀层在 $2\theta=45^\circ$ 附近均有一个比较漫散的馒头峰, 表明两种镀层的基本结构均为非晶态结构。与 Ni-P 镀层相比, Ni-P-SiC 复合镀层中还出现了 SiC 的峰, 表明 SiC 是以固体颗粒的形式存在于复合镀层中, 这与其他研究者采用微米 SiC 获得复合镀层的结果是一致的^[16-17]。

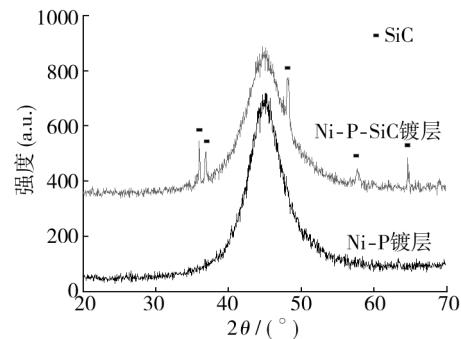


图 4 镀层的 XRD 谱

Fig. 4 X-ray diffraction pattern of the coatings

2.3 镀层的耐蚀性

裸 AZ91D 镁合金及两种镀层试样的极化曲线测试结果见图 5, 相关拟合结果见表 1。可见镁合金表面化学镀 Ni-P 或 Ni-P-SiC 镀层后, 腐蚀电位明显提高, 腐蚀电流密度明显降低, 表明其抵抗腐蚀的能力大大提高。与化学镀 Ni-P 相比, 化学镀 Ni-P-SiC 后的腐蚀电位相对较低, 腐蚀电流密度有所增大, 这主要是由于添加纳米粉末之后, 镀层中的显微缺陷增多所致。

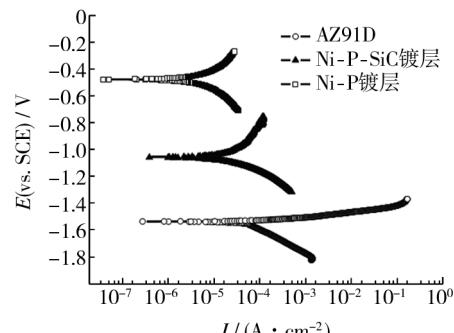


图 5 AZ91D 镁合金及其镀层样品的极化曲线

Fig. 5 Polarization curves of AZ91D magnesium alloy with and without coatings

表1 极化曲线拟合结果

Tab. 1 Fitting result of potentiodynamic polarization curves

试样	E_{corr} (vs. SCE)/V	$J_{corr}/(A \cdot cm^{-2})$
AZ91D	-1.543	1.038×10^{-4}
Ni-P 镀层	-0.482	2.016×10^{-6}
Ni-P-SiC 复合镀层	-1.063	1.122×10^{-5}

2.4 镀层的硬度及耐磨性

经显微硬度测试,AZ91D 镁合金基体的维氏硬度为 70HV,Ni-P 镀层的硬度为 516HV,而 Ni-P-SiC 复合镀层的硬度高达 643HV。可见镁合金经化学镀后,表面硬度大大提高,特别是化学镀复合镀层时。这主要是由于硬度高、分散性良好的 SiC 颗粒弥散分布在镀层中,起到了弥散强化和晶粒细化作用的缘故。

经摩擦磨损试验后,AZ91D 镁合金和两种镀层试样的摩擦系数见图 6,磨痕形貌见图 7。

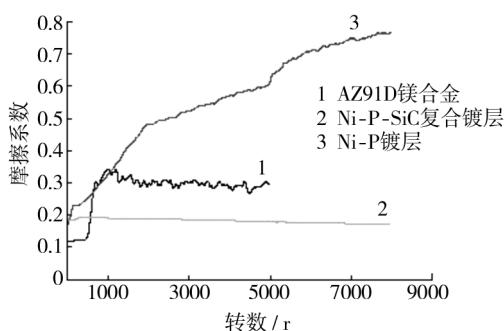
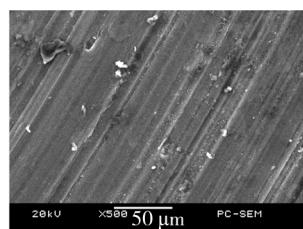
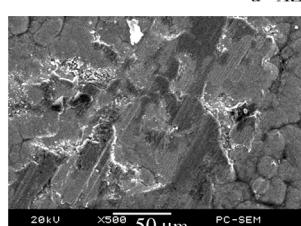


图 6 摩擦系数曲线

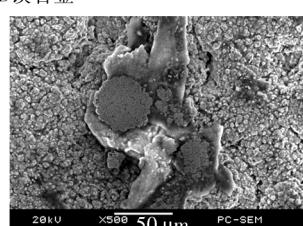
Fig. 6 Variation of friction coefficient



a AZ91D 镁合金



b Ni-P 镀层



c Ni-P-SiC 复合镀层

图 7 磨痕形貌

Fig. 7 morphology of the wear track

在相同的摩擦实验条件下,镁合金与 GCr15 对磨在经过跑合期后,摩擦系数稳定在 0.3 左右。镁合金硬度较低,在外加载荷作用下会发生较大塑性变形,使得实际接触面积较大,因此仅摩擦 5000 r 后,表面就留下了较宽的磨痕,磨痕内部可见大量较深的平行犁沟,表明磨损机制主要是摩擦偶件对其表面所产生的磨粒磨损。

化学镀 Ni-P 镀层试样与 GCr15 钢球对磨时,表现出较高的摩擦系数,并且随着磨损周次的变化,摩擦系数不断增大。与基体镁合金相比,Ni-P 镀层的硬度提高,承载能力增强,在相同的外加载荷作用下,实际接触面积减小,因此其磨痕变得窄而浅,磨痕内部可见与滑动方向相同的较浅犁沟。镀层经过 8000 r 摩擦后,出现局部剥落,这时其磨损机制主要表现为轻微的磨粒磨损。在实验测试的时间内,镀层并未遭到完全破坏,对基体仍有保护作用。

Ni-P-SiC 复合镀层试样与 GCr15 钢球对磨时,摩擦系数始终稳定在 0.18,没有出现明显的跑合期,摩擦系数曲线比较平稳。与 GCr15 钢球摩擦 8000 r 后,复合镀层表面仅有极少量的凸起部分被磨平,整个磨损过程中,镀层始终保持完好。可见在相同的实验条件下,Ni-P-SiC 复合镀层表现出了优异的耐磨性能。

由以上分析可知,SiC 微米颗粒的加入,极大地提高了 Ni-P 镀层的耐磨性能。其主要原因有以下几个方面:其一,SiC 颗粒的加入使镀层硬度大大提高,根据 Archard's 定律^[18],镀层的硬度越高,磨损量越小。高硬度使得镀层的承载能力大大提高,同时复合镀层表面高强度、高硬度的 SiC 微粒亦可以提高镀层的承载能力,在摩擦过程中,较高的承载能力使得真实接触面积大大减小,从而降低了摩擦阻力,使得复合镀层表现出优异的耐磨性能。其二,SiC 颗粒在一定程度上使基质金属避免了与对磨件的直接接触,大大减少了粘着磨损的发生^[19]。其三,尺寸较小的微米粒子在摩擦过程中起到了“滚珠轴承”效应,使得运动形式由滑动变为滚动^[20],从而使得摩擦系数进一步降低,使复合镀层具有优异的耐磨性能。

3 结论

1) 采用环保型酸洗和活化工艺进行前处理,直接在镁合金表面成功制备出了化学镀 Ni-P 镀层和 Ni-P-SiC 复合镀层。

2) 两种镀层表面均由细小均匀、致密的胞状组

织组成,无明显缺陷,与基体结合良好。在 Ni-P 化学镀层中引入不溶性 SiC 颗粒,明显细化了胞状组织,并且不改变镀层的非晶态结构。

3) 两种镀层均大大提高了镁合金的耐蚀性能。与 Ni-P 镀层相比,Ni-P-SiC 复合镀层的耐蚀性能有所下降。

4) 两种镀层均在不同程度上提高了镁合金表面的硬度和耐磨性。Ni-P-SiC 复合镀层的硬度高达 643HV,与 Ni-P 镀层相比,具有更优异的耐磨性能。

参 考 文 献

- [1] YANG Z, LI J P, ZHANG J X, et al. Review on Research and Development of Magnesium Alloys [J]. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, 2008, 21(5) :313—328.
- [2] FROES F H, ELIEZER D, AGHION E. The Science, Technology, and Applications of Magnesium [J]. *Light Metals*, 1998, 5(9) :30—34.
- [3] 李轶,程培元,华林.镁合金在汽车工业和 3C 产品中的应用[J].江西有色金属,2007,21(2) :30—33.
LI Yi, CHENG Pei-yuan, HUA Lin. Current Application of Magnesium Alloy in Automotive Industry and 3C Product Fields [J]. *Jiangxi Nonferrous Metals*, 2007, 21(2) :30—33.
- [4] 杨友,李雪松,佟金伟,等.镁合金复合化学镀(Ni-P)- Si_3N_4 复合镀层工艺研究[J].电镀与精饰,2010,32(3) :1—4.
YANG You, LI Xue-song, TONG Jin-wei, et al. Study on Technology of Composite Electroless Plating of (Ni-P)- Si_3N_4 Composite Coating on Magnesium Alloy [J]. *Plating and Finishing*, 2010, 32(3) :1—4.
- [5] 张冀,徐淑强,李青.乙醇胺添加剂对 AZ91D 镁合金表面磷化膜耐蚀性能的影响研究[J].功能材料,2009,40(12) :2104—2107.
ZHANG Ji, XU Shu-qiang, LI Qing. Effect of Ethanolamine on the Anticorrosive Properties of Phosphate Coating Prepared on AZ91D Magnesium Alloy [J]. *Journal of Functional Materials*, 2009, 40(12) :2104—2107.
- [6] RAJASEKARAN B, GANESH SUNDARA RAMAN S, RAMA KRISHNA L, et al. Influence of Microarc Oxidation and Hard Anodizing on Plain Fatigue and Fretting Fatigue Behaviour of Al-Mg-Si Alloy [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2008, 202(8) :1462—1469.
- [7] WANG Hui-long, LIU Ling-yun, DOU Yong, et al. Preparation and Corrosion Resistance of Electroless Ni-P/SiC Functionally Gradient Coatings on AZ91D Magnesium Alloy [J]. *Applied Surface Science*, 2013, 286(1) :319—327.

- [8] 韩丽萍,高翠玲.镁合金表面镀镍工艺的研究现状[J].民营科技,2009(9) :43—44.
HAN Li-ping, GAO Cui-ling. The Current Research Status of Electroless Nickel Plating on Magnesium Alloy [J]. *Private Science and Technology*, 2009(9) :43—44.
- [9] SZCZYGIE B, TURKIEWICZ A. The Effect of Suspension Bath Composition on the Composition, Topography and Structure of Electrolessly Deposited Composite Four-component Ni-W-P-ZrO₂ Coatings [J]. *Applied Surface Science*, 2008, 254(22) :7410—7416.
- [10] ALIREZAEI S, MONIRVAGHEFI S M, SALEHI M, et al. Wear Behavior of Ni-P and Ni-P-Al₂O₃ Electroless Coatings [J]. *Wear*, 2007, 262(7/8) :978—985.
- [11] 陈卫祥,甘海洋,涂江平,等. Ni-P-纳米碳管化学复合镀层的摩擦磨损特性[J]. 摩擦学学报,2002,22(4) :241—244.
CHEN Wei-xiang, GAN Hai-yang, TU Jiang-ping, et al. Friction and Wear Behavior of Ni-P-Carbon Nanotubes Electroless Composite Coating [J]. *Tribology*, 2002, 22 (4) :241—244.
- [12] 王为,李克峰. Ni-P 基纳米化学复合镀研究现状[J]. 电镀与涂饰,2003,22(5) :34—38.
WANG Wei, LI Ke-feng. Current Study of Ni-P Based Electroless Composite Coatings with Nano Particles [J]. *Electroplating & Finishing*, 2003, 22(5) :34—38.
- [13] NOVAKOFIC J, VASSILIOU P. Vacuum Thermal Treated Electroless Ni-P-TiO₂ Composite Coatings [J]. *Electrochimica Acta*, 2009, 54(9) :2499—2503.
- [14] 王茂林,刘金海,李国禄,等.镁合金(Ni-P)-SiC 纳米颗粒化学复合镀层硬度及耐磨性的研究[J].化工机械,2005,32(4) :199—202.
WANG Mao-lin, LIU Jin-hai, LI Guo-lu, et al. An Investigation on the Hardness and Wear Resistance of the Electroless Composite Plating of Magnesium Alloy (Ni-P)-SiC Nanometer Particles [J]. *Chemical Machinery*, 2005, 32 (4) :199—202.
- [15] 沟引宁,黄伟九,陈文斌,等.以硫酸镍为主盐的环保型镁合金化学镀镍工艺[J].腐蚀与防护,2010,31(3) :225—228.
GOU Yin-ning, HUANG Wei-jiu, CHEN Wen-bin, et al. Environmental Electroless Nickel Plating Technology on Magnesium Alloy in Solution with NiSO₄ as Main Salt [J]. *Corrosion & Protection*, 2010, 31(3) :225—228.
- [16] HUANG X, WU Y, QIAN L. The Tribological Behavior of Electroless Ni-P-SiC (Nanometer Particles) Composite Coatings [J]. *Plating and Surface Finishing*, 2004, 91 (7) :46—48.

(下转第 43 页)

1) 粉末冶金摩擦表面的微形貌特征可以通过镭射形貌仪器进行准确的采集,通过 MATLAB 可以对原点阵进行插值、纠错和形貌重构。

2) 在真实接触时,两个名义平整表面相互接触的过程中,存在轮廓接触区域以及真实接触区域等复杂的弹塑性区域,其中边界接触区域与固固接触区域同时存在。

3) 在实际接触过程中,固固接触区域约占名义接触面积的 6%,边界接触区域约占名义接触区域的 20%。

4) 通过给定边界膜破裂时的临界值,可以通过接触图像二值分析,直观地分析不同接触机理条件下接触区域的分布情况。

参考文献

- [1] BINNIG G, ROHRER H, et al. Tunneling Through a Controllable Vacuum Gap [J]. Applied Physical Letters, 1981, 40:178—180.
- [2] BINNING G. Atomic Force Microscope [J]. Physical Review Letters, 1986, 56(9):930—933.
- [3] GREENWOOD J A, WILLIAMSON J B P. Contact of Nominally Flat Surfaces [J]. Proc Roy Soc Lond, 1966, A295: 300—319.
- [4] WHITEHOUSE D J, ARCHARD J F. The Properties of Random Surface of Significance in Their Contact [J]. Proc Roy Soc Lond, 1970, A316:97—121.
- [5] CHANG W R, ETSION I, BOGY D B. Static Friction Coefficient Model for Metallic Rough Surfaces [J]. ASME J Tribol, 1988, 110:57—63.
- [6] LIOR K, IZHAK E. A Static Friction Model for Elastic-plastic Contacting Rough Surfaces [J]. Transaction of the ASME, 2004, 126(1):34—40.
- [7] LIOR K, IZHAK E. A Semi-analytical Solution for the Sliding Inception of a Spherical Contact [J]. Journal of Tribology, 2003, 125(3):499—506.
- [8] MAJUMDAR A, BHUSHAN B. Fractal Model of Elastic-plastic Contact between Rough Surfaces [J]. ASME J Trib, 1991, 113(1):1—11.
- [9] WANG Yan-zhong, CHEN Yan-yan, HAN Xiao. Research of Simulation Technology in Low-stress Machining on Tooth Surface of Spiral Bevel Gears Used in Aviation Industry [J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 86: 688—691.
- [10] WANG Yan-zhong, WEI Bin. Mixed-modal Disk Gas Squeeze Film Theoretical and Experimental Analysis [J]. International Journal of Modern Physics, 2013, 25(7):135—168.
- [11] 王延忠,魏彬. 激光微造型表面流体动力润滑分析 [J]. 润滑与密封, 2012, 37(12):1—4
WANG Yan-zhong, WEI Bin. Hydrodynamic Lubrication Study on Micro-texture Structure Surface [J]. Lubrication Engineering, 2012, 37(10):1—5.
- [12] 王延忠,魏彬. 大功率重载摩擦元件磨损率的分形模拟方法 [J]. 润滑与密封, 2012, 37(10):1—4
WANG Yan-zhong, WEI Bin. Fractal Wear Rate Prediction of Friction Elements with Heavy Duty [J]. Lubrication Engineering, 2012, 37(10):1—5.
- [13] 汪家道,陈大融. 规则凹坑表面形貌润滑研究 [J]. 摩擦学学报, 2003, 23(1):52—54.
WANG Jia-dao, CHEN Da-rong. Study on Lubrication of Regular Concave Surface [J]. Tribology, 2003, 23(1):52—54.
- [14] WANG Yan-zhong, WEI Bin, WU Xiang-yu. Wet Friction-Elements Boundary Friction Mechanism and Friction Coefficient Prediction [J]. Tribology Industry, 2012, 34(4): 198—205.
- [15] WANG Yan-zhong, WEI Bin. Friction Mechanism and Lock-up Friction Coefficient Prediction for Sinter Bronze Friction Materials [J]. Industrial Lubrication Tribology, 2014, 66(6):101—106.

(上接第 20 页)

- [17] 高加强,刘磊,沈彬,等. 超细 SiC 对 Ni-P 化学合金镀层组织结构的影响 [J]. 机械工程材料, 2006, 30(7):33—36.
GAO Jia-qiang, LIU Lei, SHEN Bin, et al. Electroless Ni-P-SiC Composite Coatings with Superfine Particles [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2006, 30(7):33—36.
- [18] ARCHARD J F. Contact and Rubbing of Flat Surfaces [J]. Journal of Applied Physics, 1953, 24(8):981—988.
- [19] 陈小华,李德意,李学谦,等. 碳纳米管增强镍基复合镀

层的形貌及摩擦磨损行为研究 [J]. 摩擦学学报, 2002, 22(1):6—9.

CHEN Xiao-hua, LI De-yi, LI Xue-qian, et al. Morphology and Wear Behavior of Ni-Carbon Nanotube Comoposite Coating [J]. Tribology, 2002, 22(1):6—9.

- [20] FANG L, KONG X L, SU J Y, et al. Movement Patterns of Abrasive Particles in Three-body Abrasion [J]. Wear, 1993 (162/163/164) Part B: 782—789.