

· 化学镀 ·

Ni-P-PTFE 自润滑镀层的耐磨性能及其增强机理研究

Wear Resistance and Enhanced Mechanism of Self-lubrication Ni-P-PTFE Coating

应巧宁, 李 强, 徐 洪, 陈卫增, 包辉煌, 虞塞富

(浙江师范大学 工学院, 浙江 金华 321004)

YING Qiao-ning, LI Ning, XU Hong, CHEN Wei-zeng, BAO Hui-huang, YU Xian-fu

(College of Engineering of Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China)

摘要: 采用化学复合镀技术将微米级四氟乙烯(PTFE)微粒沉积到化学镀 Ni-P 镀层中。扫描电镜(SEM)表明, 镀层中 PTFE 微粒分散均匀, 与 Ni-P 镀层结合紧密。摩擦磨损实验表明: 在 100 N 作用下, Ni-P-PTFE 镀层的摩擦系数约为 0.03, 具有良好的摩擦学性能。热处理后的摩擦磨损实验表明: 经热处理后, 镀层仍具有较低的摩擦系数和良好的耐磨性能。

关键词: 自润滑; Ni-P-PTFE; 复合材料; 摩擦学性能

Abstract: Nano polytetrafluoroethylene (PTFE) particles were deposited into electroless Ni-P coatings by electroless composite plating process. The scanning electron microscopy (SEM) indicated that PTFE particles in the coating were evenly dispersed and bound tightly with Ni-P coating. The friction and wear performance experiment showed that the friction coefficient of the Ni-P-PTFE coating was around 0.03 under 100 N, exhibiting a better tribological performance. The friction and wear performance experiment after heat treatment showed that the composite coating still had a low friction coefficient and good wear resistance after heat treatment.

Key words: self-lubrication; Ni-P-PTFE; composite material; tribological performance

中图分类号: TQ 353

文献标识码: A

文章编号: 1000-4742(2012)02-0016-03

0 前言

聚四氟乙烯(PTFE)分子结构含有 13 或 15 个 $[-CF_2-]$ 基化学重复单元, 当滑动时, 在对偶面上形成一层薄的润滑膜。该润滑膜主要为碳分子结构单元, 具有自润滑特性^[1]。此外, 将 PTFE 作为固体微粒进行化学复合沉积所得镀层也具有一些特殊的性能, 如耐腐蚀、耐磨损、自润滑等。化学复合镀 Ni-P-PTFE 发展较晚, 上世纪 80 年代后, 欧美各国、日本等才开始研究该技术。本文采用化学复合镀技术制备 Ni-P-PTFE 复合镀层, 考察了热处理温度、载荷以及 PTFE 的加入量对镀层摩擦学性能的影响, 并探讨了镀层中 PTFE 的增强机理。

1 实验

1.1 试样制备

试样基底为 10 mm×10 mm×10 mm 的 45° 铜方形试样, 淬、回火后的洛氏硬度为 43~48, 经磨削加工后起磨面的表面粗糙度为 0.8 μm。

镀液组成及工艺条件为: 硫酸镍 25 g/L, 次磷

酸钠 20 g/L, 醋酸钠 14 g/L, PTFE 8 mL/L, 稳定剂和配位剂 适量, pH 值 4.4~4.6, (85±1) °C, 1 h。

镀后试样在箱式电阻炉中经 200 °C、300 °C、400 °C 热处理 1 h。磨件材料为 GCr15, 淬、回火后的洛氏硬度为 62~65。

1.2 镀层性能测试

摩擦磨损实验在 MM-200 型磨擦试验机上进行, 采用开放式边界润滑磨损模式, 40° 机油润滑, 滴油量为 20 滴/min。上试样为往复水平移动, 移动频率为 16 次/min, 位移量为 1 mm; 下试样角速度为 200 rad/min。

试样的耐磨性通过磨痕量测量。采用 10 倍读数显微镜测量磨痕宽度, 每一磨痕测 5 次, 取平均值。通过下式计算磨痕量:

$$V = \frac{B \times b^2}{12r} \quad (1)$$

式中: V 为磨痕体积, mm³; B 为下试样宽度, 取 10 mm; b 为磨痕宽度, mm; r 为下试样半径, 取 20 mm。

使用 1 000 N·mm 的摩擦力矩测定摩擦副的摩擦系数。通过下式计算摩擦因数：

$$\mu = \frac{T}{R \times P} \quad (2)$$

式中： μ 为摩擦因数； T 为摩擦力矩，N·m； R 为下试样半径，取 0.02 m； P 为试样所承受的垂直载荷，N。

采用 Hitachi S-4800 型扫描电子显微镜观察镀层及磨损后的试样的表面形貌；采用 71-1 型显微硬度计测定镀层硬度，载荷为 1 N。

2.3 热处理实验

PTFE 的软化点为 325 ℃。在 400 ℃ 下处理较长时间将导致 PTFE 还原成气体单体；而 Ni-P 镀层经 400 ℃ 1 h 热处理后，其硬度达到最大值。实验采用 400 ℃ 1 h 和 300 ℃ 2 h+400 ℃ 10 min 两种不同热处理工艺，所需镀层的维氏硬度分别为 3 390 MPa 和 3 340 MPa，硬度值很接近，不同于文献[2]所提到的两步热处理能使硬度值进一步提高的说法。

2 结果与讨论

2.1 热处理温度的影响

图 1 为热处理温度对化学镀 Ni-P-PTFE 复合镀层摩擦因数和比磨损量的影响，载荷为 100 N。由图 1 可知，镀层的摩擦因数随着热处理温度的升高而增大，而比磨损量随着热处理温度的升高而降低。镀层磨损时，PTFE 微粒直接暴露在镀层表面，在镀层与滑动摩擦面之间产生一层薄膜。这层薄膜具有良好的润滑作用且抗剪强度较弱，同时有机聚合物在滑动过程中易被剪切脱开，所以镀层的摩擦因数较低，表现出较好的摩擦学性能。经 300 ℃ 热处理后，镀层的耐磨性能同比提高。这是由于 PTFE 分子有一层惰性的含氟外壳，使其具有突出的不黏性，赋予该复合材料很好的抗咬合性能，这时 PTFE 的自润滑性在磨损过程中起主要作用。

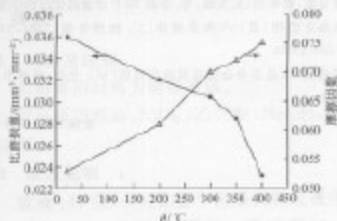


图1 热处理温度对镀层性能的影响

图2为热处理温度对化学镀 Ni-P-PTFE 复合镀层表面形貌的影响。由图2可知：镀层未经热处理及经热处理后的表面形貌均显示出明显的“梨沟”，表面形貌以磨痕为主，且随着热处理温度的升高，磨痕变浅。经 300 ℃ 1 h、400 ℃ 1 h 热处理后，磨痕消失明显，表明较高温度下的热处理提高了镀层的耐磨性能。同时文献[3-5]提到，Ni-P 合金镀层在 280 ℃ 时产生相变，生成六角亚稳相 α_1 、 α_2 、 α_3 ，而六角结构类似石墨的层片状结构，具有相似的润滑特性；同时，PTFE 的层片状结构镶嵌在基体内，起到一定的润滑保护作用，也有利于降低镀层的磨損量，提高复合镀层的摩擦学性能。



图2 热处理温度对镀层表面形貌的影响

2.2 载荷的影响

图3为载荷对化学镀 Ni-P-PTFE 复合镀层摩擦因数的影响。由图3可知：当载荷小于 100 N 时，镀层的摩擦因数变化很小；当载荷超过 100 N 后，镀层的摩擦因数明显增大。在较低载荷下，PTFE 发生一定的变形而形成润滑膜，该润滑膜具有良好的润滑效果；同时，PTFE 的层中结合力很强，而层间结合力较弱，易于发生错位迁移，在对偶面上形成的膜层具有良好的自润滑特性，进一步提高了镀层的摩擦磨损性能。在较高载荷下，由于 PTFE 变形过大，润滑膜被磨穿；同时，PTFE 的加入降低了镀层的硬度，使镀层的塑性变形增加，从而提高了镀层的摩擦因数。

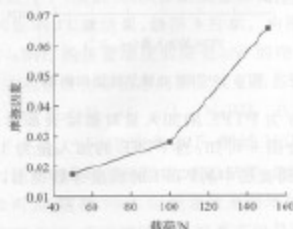


图3 载荷对镀层摩擦因数的影响

图4为载荷对化学镀 Ni-P-PTFE 复合镀层表

面形貌的影响。由图 4 可知,当载荷为 50 N 和 100 N 时,镀层表面的磨损形貌相差不大,均显示出明显的“梨沟”,而当载荷为 150 N 时,磨痕明显加深。这一变化趋势和摩擦因数的变化趋势相吻合,即:在高载荷的条件下, Ni-P-PTFE 复合镀层的耐磨性能明显减弱,这是由于镀层的硬度较低不能承受高载荷所引起的。



图 4 载荷对镀层表面形貌的影响

2.3 PTFE 的加入量的影响

图 5 为 PTFE 的加入量对化学镀 Ni-P-PTFE 复合镀层摩擦因数和磨损量的影响,载荷为 100 N。由图 5 可知,镀层的摩擦因数和磨损量在 PTFE 的加入量为 8 mL/L 时最小,磨损量也最低,即,此时镀层的耐磨性能最好。镀层中 PTFE 的质量分数随液中 PTFE 的加入量的增大先升高后降低;当 PTFE 的加入量为 8 mL/L 时,沉积到镀层中的 PTFE 的质量分数达到最大值;而后,由于 PTFE 在溶液中团聚,影响了其在镀层中的沉积。由于 PTFE 具有较好的润滑性能,镀层中 PTFE 的质量分数的增大可以提高镀层的耐磨性能。

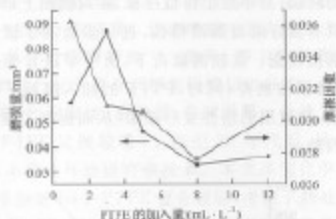


图 5 PTFE 对镀层性能的影响

图 6 为 PTFE 的加入量对镀层表面形貌的影响。结合图 5 可知:当 PTFE 的加入量为 1 mL/L 时,沉积到镀层中的 PTFE 的质量分数很小,镀层表

面出现“梨沟”,磨损较严重^[3];当 PTFE 的加入量大于 3 mL/L 时,镀层中 PTFE 的质量分数增大,镀层的磨损量降低,磨痕变浅;当 PTFE 的加入量为 8 mL/L 时,镀层中 PTFE 的质量分数达到最大,磨损量进一步降低,“梨沟”变浅,镀层表面变得光滑;而后,进一步增大 PTFE 的加入量,镀层的磨损量明显增大,磨损加剧。



图 6 PTFE 的加入量对镀层表面形貌的影响

3 结论

(1) 采用化学复合镀技术获得了 Ni-P-PTFE 复合镀层。热处理实验表明:一步热处理与两步热处理所得镀层具有相近的维氏硬度。

(2) 摩擦磨损实验表明: Ni-P-PTFE 复合镀层具有良好的摩擦学性能。当 PTFE 的加入量为 8 mL/L 时,镀层的摩擦系数最小,磨损量最低。

(3) 热处理后的摩擦磨损实验表明:经热处理后,镀层仍具有较低的摩擦系数和良好的耐磨性能。

参考文献

- [1] 李强,黄德海.自润磨复合镀层的摩擦学性能及强化机理分析[J].电镀与环保,2010,30(6):5-8.
- [2] 张永志,孙克平.化学镀 Ni-P-PTFE 的工艺及控制[J].功能材料,1999,30(1):88-90.
- [3] Ramallo A, Miranda J C. Friction and wear of electrodeless Ni-P and Ni-P + PTFE coatings [J]. Wear, 2005, 259(7): 1278-1284.
- [4] Ruxert E A, Mischler S, Landolt D. Surface chemistry effects on friction of Ni-P/PTFE composite coatings [J]. Tribology Series, 1994, 21, 329-336.
- [5] 紫金忠,赖宗和,吴玉瑞,等.非晶 Ni-P 合金晶化过程中生成的六角亚稳相(III)-六角亚稳相[J].物理学报,1984,33(7): 1-037-1-036.
- [6] 高成刚.非晶态合金及其镀层性能[M].北京:科学出版社,2004.