

镁合金表面 Ni+C 涂层的耐腐蚀与耐磨性能研究

冯凯, 李铸国, 张超

(上海交通大学 上海市激光制造与材料改性重点实验室, 上海 200240)

摘要: **目的** 提高镁合金表面的耐腐蚀和耐磨损性能。**方法** 采用非平衡磁控溅射离子镀技术与化学镀技术相结合, 在 GW83 镁合金表面制备 Ni+C 复合膜层。通过扫描电子显微镜和拉曼光谱分析了薄膜的形貌、成分和结构。利用电化学和浸泡后 ICP-AES 测试, 评价了该复合碳膜涂层的耐腐蚀性能。同时采用摩擦磨损试验获得 Ni+C 复合膜层的磨损寿命。**结果** Ni+C 复合膜层致密均匀, 表面孔隙率极低, 表面碳层为典型的类石墨膜并且含有大量的无序结构。相对于 GW83 镁合金来说, Ni+C 复合膜层的存在导致在 3.5%NaCl 溶液中的腐蚀电位正移了 301 mV, 腐蚀电流密度从 $186 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 降低至 $11 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 。浸渍后 ICP-AES 试验显示, Ni+C 涂覆的镁合金 GW83 的金属离子释放量更低。摩擦磨损试验表明, Ni+C 涂层的磨损寿命为 7000 s, 与镁合金基体相比, Ni+C 复合涂层极大地提高了其磨损寿命。**结论** 在该 Ni+C 复合膜层中, 表面碳层较致密, 与 Ni 层结合良好, 显著提高了基体的耐腐蚀性能。此外由于存在较厚的 Ni 中间层, 对膜层起到了较大的支撑作用, Ni+C 复合膜层从而延长了基体镁合金的磨损寿命。

关键词: 镁合金; 磁控溅射; C 膜; Ni 镀层; 耐腐蚀性; 耐磨性

中图分类号: TG356.16; TG178 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)03-0028-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.03.004

Corrosion and Wear Resistance of Sputtered Carbon Film Coated Magnesium Alloy with Electroless Plating Nickel Interlayer

FENG Kai, LI Zhu-guo, ZHANG Chao

(Shanghai Key Laboratory of Materials Laser Processing and Modification,
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

ABSTRACT: The work aims to improve corrosion and wear resistance of organic coating on magnesium alloys. Ni+C composite film was first prepared on the surface of GW83 magnesium alloy by combining unbalanced magnetron sputtering ion plating and chemical plating. The surface morphology and composition and structure of the coating were analyzed by using SEM observation and Raman spectrometer. Corrosion resistance of the composite carbon film coating was evaluated by performing electrochemical tests and post-dipping inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (ICP-AES) measurement. Meanwhile, wear longevity of the Ni+C composite coating was obtained by performing friction-wear test. The Ni+C composite coating featured in dense and uniform coating, extremely low surface porosity and surface carbon layer of graphite-like film containing numerous disordered structures. Compared with GW83 magnesium alloy, since the Ni+C composite coating was

收稿日期: 2016-11-27; 修订日期: 2016-12-19

Received: 2016-11-27; Revised: 2016-12-19

基金项目: 上海市教育委员会“曙光计划”资助 (12SG15)

Fund: Supported by the “Shuguang Project” (12SG15) of Shanghai Municipal Education Committee

作者简介: 冯凯 (1984—), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为表面工程。

Biography: FENG Kai (1984—), Male, Doctor, Lecturer, Research focus: surface engineering.

通讯作者: 李铸国 (1972—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为激光焊接与表面工程。

Corresponding author: LI Zhu-guo (1972—), Male, Doctor, Professor, Research focus: laser welding and surface engineering.

present, corrosion potential (E_{corr}) in 3.5wt% NaCl solution improved by 301 mV, while the corrosion current density decreased from $186 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ to $11 \mu\text{A}/\text{cm}^2$. The post dipping ICP-AES test revealed that the Ni+C coated magnesium alloy GW83 featured in less metal ion release. The friction-wear test showed that wear longevity of Ni+C composite coating was 7000 s, and thus the wear longevity was prolonged remarkably compared with the substrate of magnesium alloy. Corrosion resistance of the magnesium alloy can be greatly improved by Ni+C coating due to the thick nickel interlayer and dense surface carbon layer in the Ni+C composite coating. Furthermore, wear longevity of the magnesium alloy substrate can be effectively prolonged by coating Ni+C composite as a result of mechanical support by the thick Ni interlayer.

KEY WORDS: magnesium alloy; magnetron sputtering; carbon film; nickel coating; corrosion resistance; wear resistance

在常用金属结构材料中, Mg-Gd-Y-Zr 镁合金由于同时具有高比强度和比刚度, 而受到广泛研究^[1]。然而其自身也存在明显的不足, 比如耐蚀性和耐磨性较差, 从而制约了稀土镁合金在各领域的应用^[2]。因此, 对稀土镁合金表面沉积硬质涂层是改善镁合金耐蚀性与耐磨性的有效途径^[3]。

近年来, 国内外学者通过物理气相沉积技术在镁合金表面获得了耐蚀耐磨的膜层, 从而大大扩展了镁合金的应用范围^[4-6]。Hollstein 等人通过 PVD 技术在镁合金表面制备了 TiN 涂层, 使镁合金基体的腐蚀电流密度由 $1700 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 降到了 $300 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, 显著提高了基体的耐腐蚀性能^[7]。Altun 等人采用直流磁控溅射在 AZ91 镁合金上制备了多层 AlN (AlN+AlN+AlN) 以及 AlN+TiN 涂层^[8], 结果显示这些涂层均能提高基体的耐腐蚀性能, 其中多层 AlN 的耐蚀性优于 AlN+TiN 涂层。这是因为 AlN 与 Mg 具有相同的密排六方晶体结构, 基体和薄膜的相容性更强, 从而使薄膜与基体结合更好。Dai 等人采用混合离子束沉积在 AZ31 镁合金表面制备了掺 Cr 的 DLC 涂层, 当掺 Cr 量为 2.34% (原子数分数) 时, 膜层与基体结合良好, 并且能够显著提高镁合金的耐磨性能^[9]。Miao 等人采用 PVD 技术在 AZ91 镁合金表面制备了 TiN/CrN 涂层, 结果表明镀有 TiN/CrN 涂层能够显著提高镁合金基体的耐磨损性能^[10]。

然而在镀膜过程中, 由于硬质膜与基体之间的物理性能 (如硬度、弹性模量、热膨胀系数) 的差异, 使薄膜与基体结合较差, 甚至导致脱膜^[11-12]。Panjan 等人发现, 在磁控溅射过程中, 薄膜不可避免地存在通孔、孔洞等缺陷, 使腐蚀液易通过通孔深入基体, 由于镁合金与薄膜之间的电位差会形成电偶腐蚀, 且镁合金的电位极低, 在电偶腐蚀中作为阳极, 因此镁合金的腐蚀会加剧, 使膜层失去保护作用^[13]。Feng 和 Masami 等人报道了碳涂层具有抗磨损和抗腐蚀等优良属性, 可作为提高镁合金表面耐腐蚀和耐磨损的理想选择^[14-15]。为了进一步提高镀层耐腐蚀性能, 有关学者在 PVD 碳膜与基体间镀上一层具有合适的硬度、结合力的中间层。Reiners 等人研究得出了采用 PVD 技术与电化学 (ECD) 沉积的方法, 制备了耐磨耐蚀的复合涂层^[16]。在实验中, $20 \mu\text{m}$ 厚的化学

镀 Ni-P 涂层增加了整个膜层体系的承载能力, 因此得到的复合膜层具有更佳的耐磨损耐腐蚀性能。Vencovsky 等人在工具钢上采用将 PVD 沉积 CrN 薄膜与化学镀 NiP 中间层结合的方式, 制备了 NiP+CrN 复合涂层, 相比于 PVD 沉积的单层 CrN 薄膜来说, 复合膜层具有更高的膜基结合力及良好的耐腐蚀性能^[17]。

在文本研究中, 为了解决孔洞等缺陷导致耐腐蚀性能下降的难题, 通过使用闭合磁场非平衡磁控溅射离子电镀 (CFUBMSIP) 在镁合金上沉积碳涂层。此外, PVD 之前在镁合金表面化学镀一层较厚的 Ni 层, 用于提高薄膜的致密性, 通过 SEM 观察、电化学腐蚀和磨损试验系统地研究了该复合涂层的耐磨耐蚀性能。

1 试验

1.1 涂层制备

本实验基体材料选用 GW83 锻造镁合金, 其主要化学成分 (以质量分数计) 为: 8% Gd, 3% Y, 0.5% Zr, Mg 余量。采用线切割方法将 GW83 镁合金切成尺寸为 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 的试样, 先用丙酮去除镁合金试样表面的油污和灰尘, 然后依次对镁合金试样表面进行打磨与抛光, 最后用丙酮超声波清洗 15 min, 并利用冷风吹干。

在化学镀 Ni 之前先对 GW83 镁合金基体进行预处理, 然后采用化学镀镍方法对预处理后的镁合金进行化学镀镍, 最后采用磁控溅射在涂覆有 Ni 层的镁合金上镀碳膜。在化学镀镍步骤中, 所用溶液为 $\text{NiCO}_3 \cdot 3\text{Ni}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ($10 \sim 20 \text{ g/L}$)、 $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ($20 \sim 35 \text{ g/L}$)、 HF ($20 \sim 50 \text{ mL/L}$)、乳酸 ($20 \sim 40 \text{ mL/L}$) 和光亮剂的混合溶液。光亮剂由 CdSO_4 ($1.8 \sim 3.8 \text{ mg/L}$) 和 KIO_3 ($3 \sim 5 \text{ mg/L}$) 组成。所述溶液的 pH 值为 $4.5 \sim 5.0$ 。

本实验采用英国 Teer 公司生产的 UDP650 型闭合场非平衡磁控溅射离子镀装置, 采用 2 个 99.99% 纯铬靶和 2 个 99.99% 纯石墨靶 (C) 在 GW83 镁合金上沉积具有成分梯度的 C/Cr 膜。在制备碳膜之前,

先在基体上施加一负偏压,用高能 Ar^+ 对基体进行强烈轰击,以清洗基体表面污物及去除基体氧化膜,从而使基体表面活化及提高膜基结合强度。镀膜过程中的氩气流量为 18 mL/min ,背底真空度为 $6.7 \times 10^{-3} \text{ Pa}$,转速为 4.0 r/min 。制取底层时,金属靶 (MAG1/3) 电流逐渐增大;制取过渡层时,金属靶电流逐渐减小,同时 2 个石墨靶 (MAG2/4) 电流逐渐增大;制取表层纯碳膜时,石墨靶电流保持一定。通过调整金属靶电流和石墨靶电流的变化,使过渡层的成分连续变化。

1.2 性能测试及组织观察

1) 采用 HITACHI S-4800 的场发射扫描电子显微镜 FE-SEM 观察碳膜的表面和横截面形貌,确定碳膜表面是否存在孔洞等缺陷,采用 EDS 检测膜层横截面的元素分布。此外,采用德国 Bruker Optics 公司 Senterra R200-L 型色散型共聚焦拉曼光谱仪,激发波长为 532 nm (氩离子激光器),对碳膜的价键结构进行分析。

2) 将所有用于电化学测试的样品嵌入连接铜线的背面的环氧树脂中,进行开路电位 (OCP) 和极化曲线测试,以评价未涂覆和涂覆的镁合金在电化学工作站上的耐腐蚀性能。使用三电极系统,其由铂片 (对电极)、饱和甘汞电极 (SCE, 作为参考电极) 和样品 (工作电极) 组成。所有的电化学测试均在室温下的 $3.5\% \text{ NaCl}$ 溶液中进行,通过极化曲线来研究样品的电

化学腐蚀行为。在本文的电化学试验中,先测量体系的开路电位,让体系达到稳定状态再测量电位极化。

3) 为了更好地衡量镁合金的耐腐蚀性能以及解释其腐蚀行为,本文进行了浸泡实验。将测试样品浸泡于 $3.5\% \text{ NaCl}$ 溶液中 5 h ,采用美国 Agilent 公司的 Agilent 7500a 电感耦合等离子体质谱仪 (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer),测试浸泡后溶液 (约 100 mL) 中金属离子 (如 Mg 、 Cr 、 Ni 等) 的释放量。

4) 采用 Pin-On-disk 销盘磨损仪测试样品的耐磨损性能。在常温下测试,摩擦副为钢球,测试时的加载量为 2 N ,转动速度为 637 r/min ,测试时间为 1800 s 和 8000 s 。根据实时测试的时间-摩擦力曲线可获得镀层的摩擦性能和耐磨性,从而综合评定镀层的摩擦磨损性能。

2 结果及分析

2.1 表面形貌与成分分析

图 1 为碳膜和 Ni+C 复合膜层的表面形貌。从图 1a 可以看出,碳膜颗粒间存在少量孔洞,这些孔洞会对膜层的耐腐蚀性能有极大的影响。相比较而言,图 1b 中的 Ni+C 复合膜层成聚集的胞状,分布较均匀,表面更加致密,具有更小的晶粒尺寸,这有助于提高膜层的耐腐蚀性能。

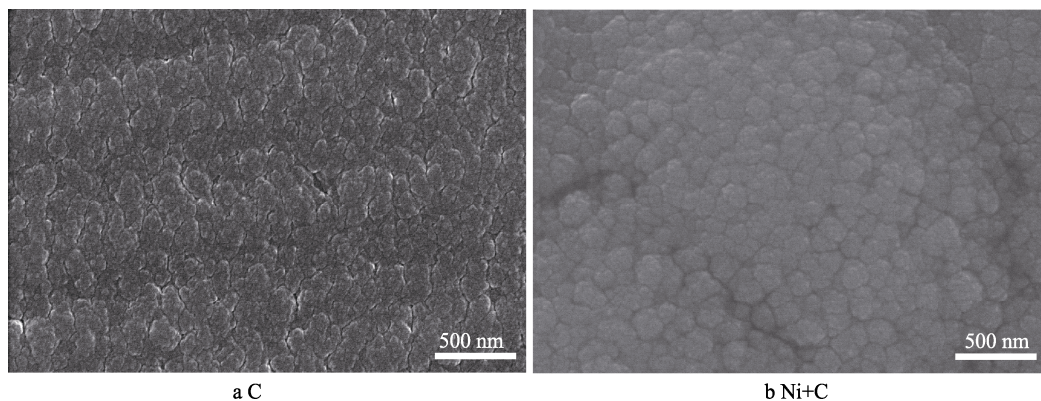


图 1 膜层的表面形貌
Fig.1 Surface morphologies of the coatings

碳膜和 Ni+C 复合涂层的拉曼光谱图如图 2 所示,对该图谱进行拟合、分峰可知, D (无序) 峰位于 $1300 \sim 1450 \text{ cm}^{-1}$ 范围内,对应无序、细小的石墨结构; G (石墨) 峰位于 $1550 \sim 1580 \text{ cm}^{-1}$ 范围内,对应膜内的层片 sp^2 团簇结构^[18]。在图 2a 中, D 峰位于 1379 cm^{-1} 附近,而 G 峰在 1577 cm^{-1} 附近。图 2b 中,对于 Ni+C 复合膜层, D 峰在 1385 cm^{-1} 附近,而 G 峰在 1575 cm^{-1} 附近。这说明碳膜和 Ni+C 复合膜层

的表面碳层均为典型的类石墨薄膜结构。从图 2a 和 2b 可以看出, D 峰积分强度均大于 G 峰积分强度,这表明碳膜和 Ni+C 复合涂层的碳层中均含有大量的无序结构。Ni+C 涂层和 EDS 线扫描的横截面如图 3 所示。从图 3a 和 3b 可以看出,薄膜与基体结合良好。Ni+C 涂层的总厚度为 $22.5 \mu\text{m}$,其中碳层为 $1.7 \mu\text{m}$,镍层为 $20.8 \mu\text{m}$ 。从 EDS 线扫描图中可以看出, C、Cr 元素过渡均匀,外层碳膜与 Ni 层结合良好。

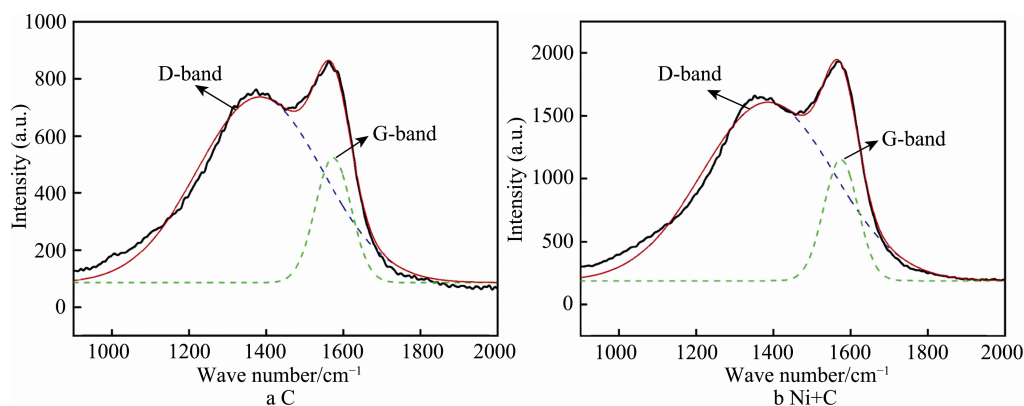


图 2 不同膜层拉曼光谱及拟合、分峰结果
Fig.2 Raman spectroscopy, simulation and peak separation of the coatings

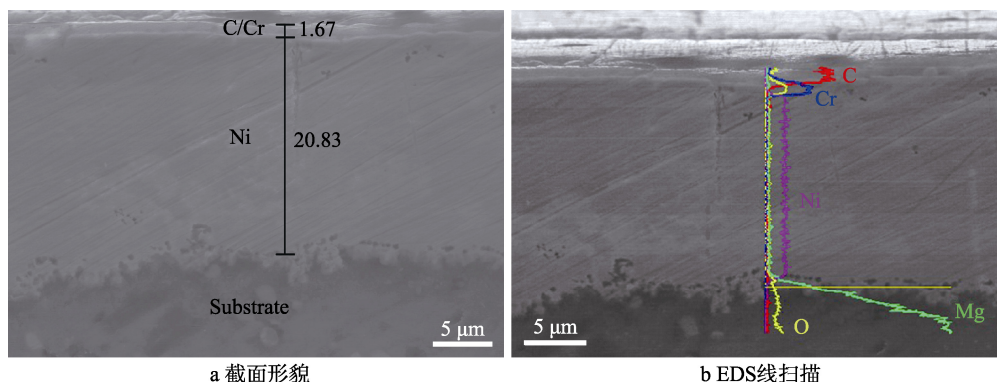


图 3 Ni+C 复合膜层横截面
Fig.3 The cross-section of the Ni+C coating: a) the morphology; b) the EDS line-scan

2.2 耐腐蚀性能

在 3.5%NaCl 溶液腐蚀环境中, GW83 镁合金和镀膜镁合金的开路电位 (OCP) 和时间的关系如图 4 所示。可以看出, 1 h 后体系达到稳定状态。未镀膜镁合金的开路电位最低, 稳定在 -1727 mV; 碳膜的开路电位较低, 但仍高于 GW83 的开路电位, 为 -1591 mV; Ni 层和 Ni+C 复合膜层的开路电位分别稳定在 -1301 mV 和 -1412 mV。因此, 在 3.5%NaCl 溶液中, 碳膜、Ni 层、Ni+C 复合膜层的稳定开路电位均高于 GW83 镁合金的开路电位, 这说明与 GW83 相比, 这些膜层有更低的腐蚀倾向。

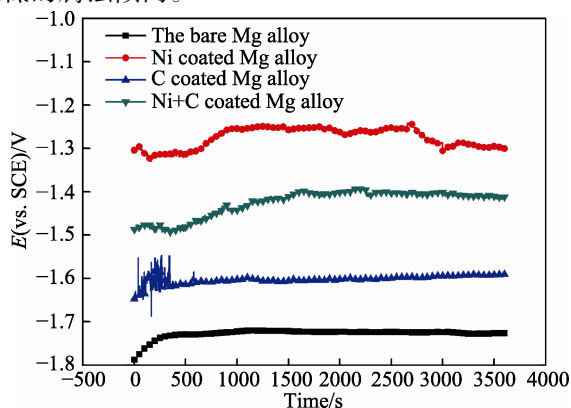


图 4 不同膜层与基体在 3.5%NaCl 溶液中的开路电位曲线
Fig.4 Open circuit potential of different coatings and substrates in the 3.5 wt% NaCl solution

图 5 为未涂覆和涂覆的 GW83 样品在 3.5%NaCl 溶液腐蚀环境中的动电位极化行为。根据 King 等人^[19]所示的 Tafel 外推法, 计算这些样品的腐蚀参数, 见表 1。从表 1 可以看出, 尽管 Ni 层和碳膜的腐蚀电流密度比 GW83 镁合金的高, 但是 Ni+C 复合膜层的腐蚀电流密度比未镀膜的要低一个数量级。从图 3 所示的 SEM 图像可以看出, 单层 C 膜由于孔洞的存在会加剧基体的腐蚀, 而 Ni+C 复合膜层非常致密且孔隙率极低, 这降低了凹坑发生的可能性, 同时也降低了腐蚀坑的数量, 从而能很好地保护镁合金基体。因此, Ni+C 复合膜层可以极大地提高 GW83 镁合金的耐腐蚀性能。

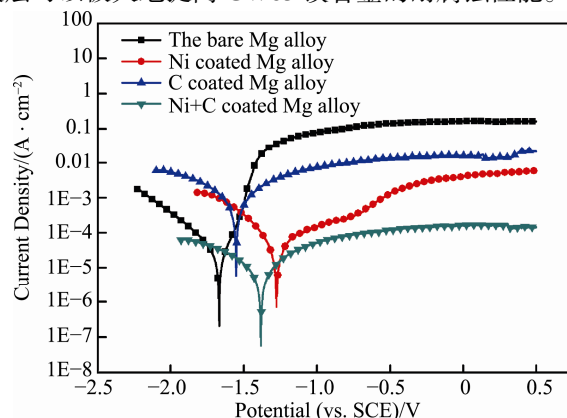


图 5 不同膜层与基体在 3.5%NaCl 溶液中的极化曲线
Fig.5 Polarization curves of different coatings and substrates in the 3.5 wt% NaCl solution

表1 所有样品在 3.5%NaCl 溶液中的腐蚀参数
Tab.1 Corrosion parameters of all the samples
in the 3.5 wt% NaCl solution

样品	$E_{\text{corr}}/\text{mV}$	$J_{\text{corr}}/(\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$
镁合金基体	-1673	90
Ni 层	-1272	188
碳膜	-1549	1173
Ni+C 复合膜层	-1372	11

由 ICP-AES 测量的样品在 3.5% NaCl 溶液中浸泡 5 h 后的金属离子含量结果如表 2 所示。GW83 镁合金在浸泡之后, 总体的金属离子释放量为 75.16ppm。相对而言, 只镀 Ni、只镀 C 以及 Ni+C 样品的金属离子释放总量分别为 4.95、49.12、4.76ppm, 可知镀膜镁合金的金属离子释放总量都得到了降低。碳膜的离子释放量要大于镀 Ni 层, 这是碳膜厚度更薄且存在缺陷所致。Ni+C 复合膜层的离子释放总量最少, 这得益于复合膜层致密良好的组织结构。总而言之, ICP 结果和电化学结果吻合, Ni+C 复合膜层可以很好地提高 GW83 镁合金基体的耐腐蚀性能。

表2 样品在 3.5%NaCl 溶液中浸泡 5 h 后的
Mg、Cr、Ni 离子释放浓度
Tab.2 Mg, Cr, Ni ions released from samples
after 5 h immersion

样品	Ion concentrations after 5 h immersion (ppm)			
	Mg	Cr	Ni	Total
镁合金基体	75.16	—	—	75.16
Ni 层	4.93	—	0.02	4.95
碳膜	49.12	0.00	—	49.12
Ni+C 复合膜层	4.75	0.00	0.01	4.76

2.3 摩擦磨损性能

图 6 为镁合金基体与镀膜镁合金的摩擦系数与磨损时间的关系曲线。从图 6 可以看出, 镁合金基体的摩擦系数较低且相对稳定, 平均值约为 0.1。对于镀碳膜的镁合金样品, 摩擦系数在开始的几秒内急剧增加, 这表示碳膜在开始阶段发生失效。对于 Ni 层, 在大约 3000 s 时, 摩擦系数有一个突降的过程, 这表明 Ni 层在 3000 s 后已失效。相比之下, Ni+C 复合膜层在起初的几秒钟内从 0.2 增加到 0.75, 7000 s 时摩擦系数从 0.75 突降至 0.1, 这表明 Ni+C 的磨损寿命为 7000 s。由此可见, Ni+C 复合涂层极大地提高了镁合金基体的磨损寿命, 这是由于较厚的 Ni 层与表面碳层结合良好, 降低了膜层内应力, 使薄膜的承载能力得到了提高, 在磨损过程中, Ni+C 复合膜层能

够有效地保护镁合金基体, 从而延长了镁合金基体的磨损寿命。

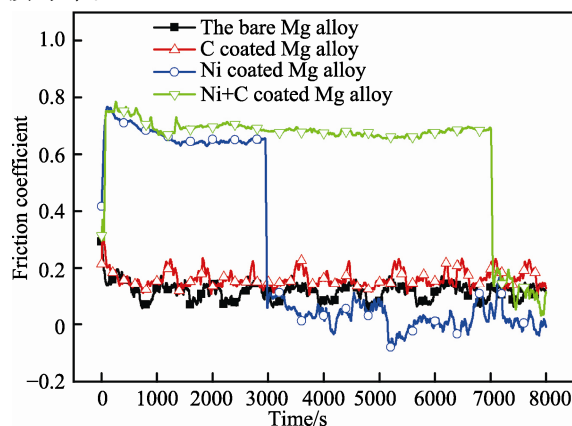


图6 不同膜层及基体镁合金的摩擦系数

Fig.6 Coefficient of friction (COF) of GW83 magnesium alloy with different coatings and substrates

3 结论

1) Ni+C 复合膜层致密均匀, 表面几乎没有孔隙, 相比之下, 没有 Ni 中间层的碳膜表面致密度较低, 碳颗粒之间存在一些孔洞等缺陷, 这些缺陷会对膜层的耐腐蚀性能形成不利的影响。拉曼光谱显示碳膜以及 Ni+C 复合膜层的碳层均是典型的类石墨结构且含有大量的无序结构。

2) Ni+C 复合膜层的腐蚀电位为 -1372 mV, 腐蚀电流密度为 $11 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, 与镁合金基体相比下降了一个数量级, 这说明 Ni+C 复合膜层大大提高了镁合金基体的耐腐蚀性能。一方面 Ni 的开路电位相对来说很低, 使膜层具有较低的腐蚀倾向, 另一方面, 较厚的 Ni 中间层提高了膜层的致密度, 不仅使表层碳膜的孔隙率降低, 而且能够有效地阻碍腐蚀介质进入基体, 从而极大地提高了 GW83 镁合金的耐腐蚀性能。

3) 在磨损测试中, Ni+C 复合膜层大幅度提高了 GW83 镁合金的耐磨损性能。这是因为较厚的 Ni 中间层, 不仅起到了过渡各层硬度的作用, 而且降低了膜层的内应力, 对膜层起到了较大的支撑作用, 使复合膜层的磨损寿命有所延长。

参考文献:

- [1] JIN J, LIU C, FU S, et al. Electroless Ni-P Plating on Mg-10Gd-4.8Y-0.6Zr Magnesium Alloy with a New Pre-treatment Process[J]. Surface and Coatings Technology, 2011, 206(2): 348—353.
- [2] GADOW R, SCHERER D. Composite Coatings with Dry Lubrication Ability on Light Metal Substrates[J]. Surface and Coatings Technology, 2002, 151: 471—477.
- [3] JIANG Y F, BAO Y F, ZHANG G W. Corrosion Protection

- of Composite Coating Combining Ceramic Layer, Copper Layer and Benzotriazole Layer on Magnesium Alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20: s693—s696.
- [4] ÇALIŞKAN H. Effect of Test Parameters on the Micro-abrasion Behavior of PVD CrN Coatings[J]. Measurement, 2014, 55: 444—451.
- [5] BAYÓN R, IGARTUA A, FERNÁNDEZ X, et al. Corrosion-Wear Behaviour of PVD Cr/CrN Multilayer Coatings for Gear Applications[J]. Tribology International, 2009, 42(4): 591—599.
- [6] XIAO Y, SHI W, LUO J, et al. The Tribological Performance of TiN, WC/C and DLC Coatings Measured by the Four-ball Test[J]. Ceramics International, 2014, 40(5): 6919—6925.
- [7] HOLLSTEIN F, WIEDEMANN R, SCHOLZ J. Characteristics of PVD-coatings on AZ31hp Magnesium Alloys[J]. Surface and Coatings Technology, 2003, 162(2): 261—268.
- [8] ALTUN H, SEN S. The Effect of PVD Coatings on the Wear Behaviour of Magnesium Alloys[J]. Materials Characterization, 2007, 58(10): 917—921.
- [9] DAI W, WU G, WANG A. Preparation, Characterization and Properties of Cr-incorporated DLC Films on Magnesium Alloy[J]. Diamond and Related Materials, 2010, 19(10): 1307—1315.
- [10] MIAO Q, CUI C, PAN J, et al. Tribological Behavior of Magnesium Alloy AZ91 Coated with TiN/CrN by Arc-glow Plasma Depositing[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2006, 19(3): 266—270.
- [11] WU G, DING K, ZENG X, et al. Improving Corrosion Resistance of Titanium-coated Magnesium Alloy by Modifying Surface Characteristics of Magnesium Alloy Prior to Titanium Coating Deposition[J]. Scripta Materialia, 2009, 61(3): 269—272.
- [12] WU G, DAI W, ZHENG H, et al. Improving Wear Resistance and Corrosion Resistance of AZ31 Magnesium Alloy by DLC/AlN/Al Coating[J]. Surface and Coatings Technology, 2010, 205(7): 2067—2073.
- [13] PANJAN P, GSELMAN P, KEK-MERL D, et al. Growth Defect Density in PVD Hard Coatings Prepared by Different Deposition Techniques[J]. Surface and Coatings Technology, 2013, 237: 349—356.
- [14] FENG K, SHEN Y, SUN H, et al. Conductive Amorphous Carbon-coated 316L Stainless Steel as Bipolar Plates in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34(16): 6771—6777.
- [15] MASAMI I, SETSUO N, TSUTOMU S, et al. Improvement of Corrosion Protection Property of Mg-alloy by DLC and Si-DLC Coatings with PBII Technique and Multi-target DC-RF Magnetron Sputtering[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2009, 267(8): 1675—1679.
- [16] REINERS G, GRIEPENTROG M. Hard Coatings on Magnesium Alloys by Sputter Deposition Using a Pulsed DC Bias Voltage[J]. Surface and Coatings Technology, 1995, 76: 809—814.
- [17] VENCOSKY P K, SANCHEZ R, BRANCO J R T, et al. Enhancing Corrosion Resistance of PVD-coated Tools[J]. Surface and Coatings Technology, 1998, 108: 599—603.
- [18] WANG Q, ZHOU F, ZHOU Z, et al. Effect of Titanium or Chromium Content on the Electrochemical Properties of Amorphous Carbon Coatings in Simulated Body Fluid[J]. Electrochimica Acta, 2013, 112: 603—611.
- [19] KING A D, BIRBILIS N, SCULLY J R. Accurate Electrochemical Measurement of Magnesium Corrosion Rates: A Combined Impedance, Mass-Loss and Hydrogen Collection Study[J]. Electrochimica Acta, 2014, 121: 394—406.