

doi: 10.3969/j.issn.2095-1744.2020.12.008

搅拌速度对 LA141 镁锂合金纳米复合镀层的影响

张 奇, 马 勤, 江恬恬

(兰州理工大学 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 兰州 730050)

摘 要:为进一步扩大超轻 LA141 镁锂合金的应用范围, 提高其表面硬度、耐腐蚀性和耐磨性, 采用化学复合镀的方式在 LA141 镁锂合金表面制备 Ni-P/nano-Al₂O₃ 复合镀层, 主要研究了搅拌速度对复合镀层物相结构、微观形貌、硬度、耐腐蚀性和耐磨性的影响。结果表明:随着搅拌速度的增加, 复合镀层表面的纳米粒子沉积量先增加后减少, 其硬度、耐腐蚀性和耐磨性同样呈现出先增加后减小的趋势。当镀液搅拌速度为 600 r/min 时, 复合镀层的耐腐蚀性最好, 其腐蚀电位和腐蚀电流密度分别为 -0.502 V 和 3.85×10^{-5} A/cm²; 当镀液搅拌速度为 800 r/min 时, 复合镀层的纳米粒子沉积量最多, 耐磨性最好, 其摩擦系数在 0.45~0.55, 磨痕宽度约为 750 μm。

关键词: 镁锂合金; 化学复合镀; 耐腐蚀性; 耐磨性

中图分类号: TG178

文献标志码: A

文章编号: 2095-1744(2020)12-0048-07

Effect of Stirring Speed on LA141 Magnesium-Lithium Alloy Nano-composite Coating

ZHANG Qi, MA Qin, JIANG Tiantian

(State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metals,
Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: In order to further expand the application range of ultra-light LA141 magnesium-lithium alloy, improve its surface hardness, corrosion resistance and wear resistance simultaneously, the Ni-P/nano-Al₂O₃ composite coating was prepared on the surface of the LA141 magnesium-lithium alloy by chemical composite plating. The effects of stirring speed on the phase structure, micromorphology, hardness, corrosion resistance and wear resistance of the composite coating were studied. The results show that with the increase of the stirring speed, the deposition amount of nanoparticles on the surface of the composite coating increases firstly and then decreases, and the hardness, corrosion resistance, wear resistance also show the trend of first increasing and then decreasing. When the plating solution stirring speed is 600 r/min, the corrosion resistance of the composite coating is the best, its corrosion potential and corrosion current density are -0.502 V and 3.85×10^{-5} A/cm² respectively; When the plating solution stirring speed is 800 r/min, the composite coating has the largest deposition amount of nanoparticles and the best wear resistance. The friction coefficient is between 0.45 and 0.55, and the width of the wear scar is about 750 μm.

Key words: magnesium-lithium alloy; chemical compound plating; corrosion resistance; wear resistance

收稿日期: 2020-04-19

作者简介: 张 奇(1994—), 男, 硕士, 主要从事镁锂合金表面处理技术研究。

通信作者: 马 勤(1959—), 男, 博士, 教授, 主要从事新材料技术研究。

引用格式: 张 奇, 马 勤, 江恬恬. 搅拌速度对 LA141 镁锂合金纳米复合镀层的影响[J]. 有色金属工程, 2020, 10(12): 48-54.

ZHANG Qi, MA Qin, JIANG Tiantian. Effect of Stirring Speed on LA141 Magnesium-Lithium Alloy Nano-composite Coating[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2020, 10(12): 48-54.

21 世纪进入新能源时代,轻量化材料逐步为各领域所青睐,尤其是航空航天、汽车、3C 等领域对结构件减重逐步重视,而结构件的减重直接影响能源的消耗,因此轻量化材料对于推动能源的利用以及经济发展具有重要作用^[1-3]。镁锂合金由 Mg 元素和 Li 元素组成,是世界上最轻的合金材料,被称为新世纪绿色环保工程材料,在各领域发展中具有独特的地位^[4-6]。LA141 作为典型商用镁锂合金, Li 元素含量达到 14%,因此相比于其他低 Li 含量的镁锂合金,其密度低、比强度和比刚度高,是各领域所青睐的合金材料^[7-8]。但 LA141 镁锂合金硬度低,耐蚀性和耐磨性差,因此提高 LA141 镁锂合金表面性能对于其进一步发展具有重要意义。

目前镁锂合金表面防护的方法主要有化学镀与电镀、化学转化、阳极氧化、微弧氧化、有机-无机杂化、热喷涂等^[9-11],其中化学镀具有镀层外观质量好、工艺相对简单的特点,在其基础上发展起来的化学复合镀相比于传统单一的化学镀,镀层的硬度、耐蚀性和耐磨性均有所提高^[12-13],因此将其应用于 LA141 镁锂合金表面防护,提高 LA141 表面硬度,改善其表面耐蚀性和耐磨性,对于推动 LA141 镁锂合金进一步实际工程应用具有重要意义。

1 实验材料及方法

1.1 表面预处理

基体材料为 LA141 镁锂合金挤压材,由郑州轻研究所提供,其基本化学组分为:Li 14.5%, Al 1%, Mn 0.15%, Cu 0.01%, Ni 0.005%, Mg 余量,实验所用镁锂合金均切割成 20 mm×40 mm×3 mm 的尺寸。将切割好的镁锂合金试样片分别用 320#、400#、600#、800#、1 000# 水性砂纸打磨,并在无水乙醇里超声清洗 10 min,然后将其置于真空干燥箱中干燥待用。

碱洗除油:将镁锂合金试样放入含有 NaOH 25 g/L, Na₃PO₄ 20 g/L, Na₂SiO₃ 10 g/L 的碱洗液中,在 60 °C 水浴温度条件下超声清洗 10 min,并用蒸馏水对其表面多次冲洗。酸洗:将碱洗后的镁锂合金试样放入含有 CrO₃ 180 g/L, Fe(NO₃)₃ 40 g/L, NaF 4 g/L 的酸洗液中,在室温下酸洗 1 min,酸洗之后的镁锂合金须立刻用蒸馏水冲洗。活化:将酸洗后的镁锂合金试样放入含有 NH₄HF₂ 90 g/L, NaF 4 g/L 的活化液中,在室温下超声活化 3 min,活化后的镁锂合金表面呈暗灰色。

1.2 化学复合镀工艺设计

经过实验对比,确定 LA141 镁锂合金化学镀 Ni-P 镀液成分为:主盐 NiSO₄ 25 g/L、还原剂 NaH₂PO₂ 20 g/L、络合剂 C₆H₅Na₃O₇ 9 g/L、缓冲剂 NH₄HF₂ 10 g/L、HF 12 mL/L、稳定剂 CH₄N₂S 2 mg/L、氨水少量。

由于纳米粒子容易团聚,因此须在镀液中加入表面活性剂和分散剂。首先称取一定量的聚乙二醇(80 mg/L)和十二烷基苯磺酸钠(80 mg/L)以及 Al₂O₃ 纳米粒子(6 g/L 50 nm),再加入少量蒸馏水配制成纳米粒子分散液,将其超声分散 30 min。然后将少量配制好的化学镀液加入到纳米粒子分散液中,再次超声震荡 30 min,最后将所有镀液加入到含有纳米粒子的溶液中,并在数显磁力搅拌器上搅拌 2 h。将化学复合镀液置于恒温磁力搅拌器中,调节镀液温度为 85 °C、pH=6.4,控制镀液搅拌速度 200~1 000 r/min。

1.3 复合镀层表征

1)物相形貌分析。采用 D/max-2400 型 X 射线衍射仪对复合镀层表面进行物相分析,采用 Quanta450FEG 场发射扫描电子显微镜对复合镀层进行形貌观测。

2)硬度分析。采用 HV-1000B 数显显微硬度计对复合镀层表面进行硬度测量,每个试样测量 7 次,取其平均值作为最后的硬度值,实验加载载荷为 200 g,保压时间为 10 s。

3)耐蚀性分析。采用上海辰华公司生产的 CHI600E 型电化学工作站,在 25 °C 条件下对复合镀层进行塔菲尔极化曲线和交流阻抗测试,电化学测量为三电极体系,腐蚀介质为 3.5% 的 NaCl 溶液。测量塔菲尔极化曲线时,初始电位选择 -2.4 V,结束电位为 0.5 V,扫描速度为 5 mV/s;测量交流阻抗时,频率选择范围为 10⁻¹~10⁵ Hz,从高频向低频扫描。

4)耐磨性分析。采用中科院兰州化学物理研究所的 UMT-3 摩擦磨损试验机对复合镀层进行摩擦磨损性能测试,测试方式为往复摩擦磨损,加载载荷为 5 N,频率为 5 Hz,往复行程为 5 mm,往复时间为 15 min,对磨副为直径 5 mm 的 GCr 轴承钢球。

2 结果与讨论

2.1 搅拌速度对复合镀层物相的影响

图 1 为 LA141 镁锂合金纳米化学复合镀层

的 XRD 图谱。结果表明,复合镀层 XRD 图谱均在 $2\theta=45^\circ$ 附近处开始出现了散射峰,这是因为在化学镀过程中镀液中的 H_2PO_2^- 在一定条件下水解放出 H,随后 Ni^{2+} 与水解出的 H 原子交换电子还原成 Ni 并沉积在基体的表面,通常 Ni^{2+} 被还原的同时, H_2PO_2^- 也会在加热的条件下被 H 还原出 P,P 原子随后固溶到面心立方结构的 Ni 晶格中,导致晶格畸变增大,并随着 Ni-P 镀层中的 P 含量增加,晶化程度越来越低,而非晶化程度越来越大。

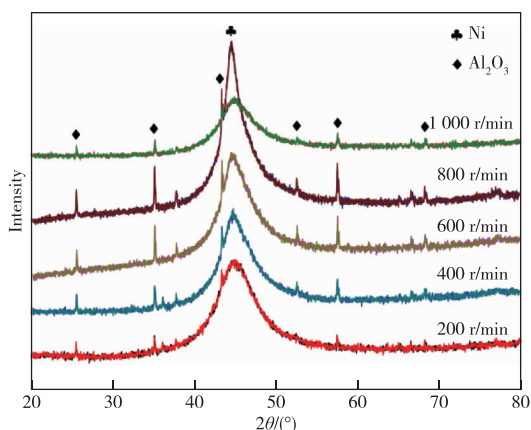


图 1 纳米复合镀层 XRD 图谱

Fig. 1 XRD patterns of nano-composite coating

此外,从图谱中可知,除了散射峰外还包括其他晶型峰,该晶型峰为 Al_2O_3 粒子的衍射峰,且当镀液搅拌速度为 200 r/min 和 1 000 r/min 时, Al_2O_3 粒子的相对衍射强度较低,衍射峰的数量相对较少,当搅拌速度在二者之间时, Al_2O_3 粒子的衍射强度较高。这主要是因为搅拌速度较低时,化学镀液中的纳米 Al_2O_3 粒子容易团聚,不利于沉积,搅拌速度较高时,试样表面的纳米 Al_2O_3 粒子在镀液快速冲刷下不容易附着在其表面,因此随 Ni、P 沉积在表面的纳米粒子相对较少,从而造成其纳米粒子的相对衍射强度较低。

2.2 搅拌速度对复合镀层形貌的影响

图 2 为 LA141 镁锂合金表面纳米复合镀层形貌,从图 2 中可知,不同搅拌速度下的复合镀层结构主要为非晶态的 Ni-P 胞状结构,且纳米粒子弥散在其表面。当搅拌速度为 200 r/min 时,复合镀层附着部分白色颗粒,此白色颗粒为团聚的纳米 Al_2O_3 粒子,且复合镀层表面的纳米粒子沉积量较少,这可能是因为当搅拌速度较低时,镀液中的纳米粒子团聚量较大,从而出现了复合镀层中纳米粒子沉积量少的情況。

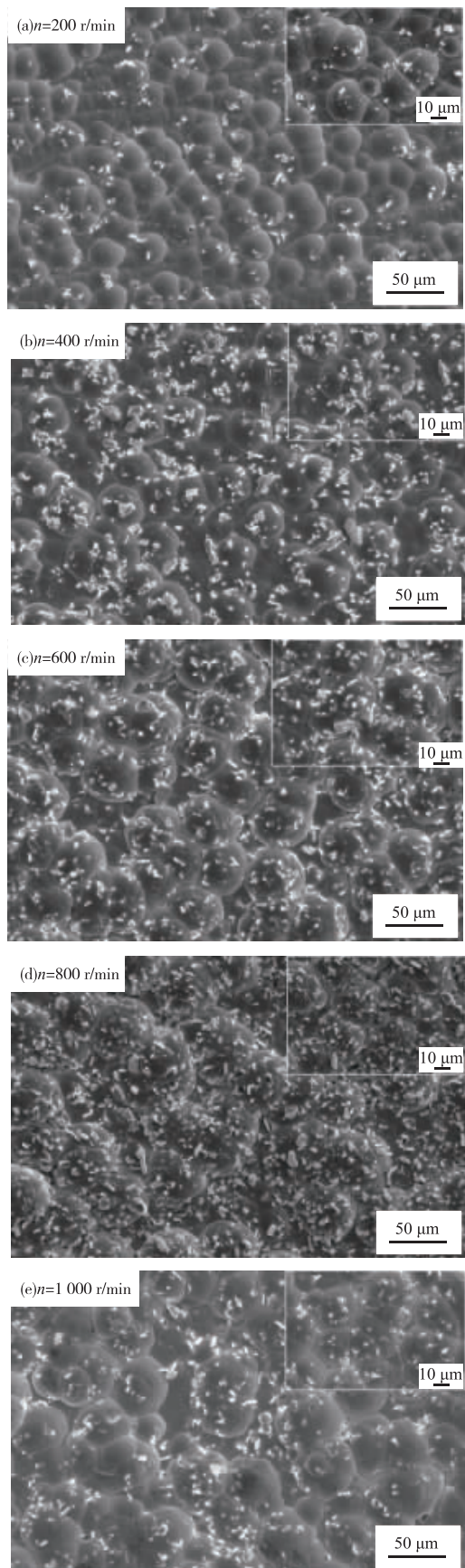


图 2 纳米复合镀层形貌

Fig. 2 Morphology of nano-composite coating

当搅拌速度为 400 r/min 时,复合镀层表面的纳米粒子沉积量相对增加,且均匀地分散在其表面,同时也可以看出复合镀层表面结构发生变化,这是因为,一方面化学复合镀的共沉积使其表面镶嵌了部分纳米颗粒,另一方面搅拌作用开始影响 Ni-P 的结核状态和化学沉积过程。

当搅拌速度达到 600 r/min 时,复合镀层形貌出现较大变化,纳米粒子更加均匀地分散在其表面且纳米粒子沉积量变多,这是因为搅拌速度的提高有利于化学镀液中的纳米粒子更好地分散在镀液里,并随 Ni、P 一起共沉积到试样表面,同时可以清楚地看到纳米粒子是以镶嵌的方式沉积在镀层中,镀层表面分布着不同团聚态的纳米粒子,但在其表面出现部分纳米粒子脱落的现象,因此可以看到镀层出现微孔。

当搅拌速度为 800 r/min 时,复合镀层表面的纳米粒子沉积量进一步增加,其表面形貌结构与图 2(c)相似,但表面微孔数量也较多,这说明当镀液搅拌速度增加到一定程度时,共沉积到 Ni-P 镀层中的纳米粒子被镀液快速冲刷下去,造成表面缺陷。

当搅拌速度达到 1 000 r/min 时,复合镀层表面的纳米粒子沉积量开始减少,纳米粒子的均匀分散性相对较差,这是因为搅拌速度过大,镀液中的纳米粒子虽团聚效果减弱,但实际沉积到复合镀层表面的纳米粒子减少,且沉积到表面的纳米粒子在镀液的快速冲刷下脱离镀层表面。

2.3 搅拌速度对复合镀层硬度的影响

图 3 为 LA141 镁锂合金纳米复合镀层硬度,镀液搅拌速度在 200、400、600、800 和 1 000 r/min 下所对应的硬度值分别为 670.2、731.5、780.4、850.7 和 680.8 HV_{0.2}。

从图 3 可见纳米复合镀层的硬度值普遍偏高,这是因为,一方面在 Ni-P 沉积的过程中纳米粒子与其一起沉积到试样表面,对 Ni-P 镀层起到弥散强化作用,另一方面搅拌作用使镀层的胞状结构更加致密。

2.4 搅拌速度对复合镀层耐蚀性的影响

2.4.1 塔菲尔极化曲线

图 4 为 LA141 镁锂合金表面纳米复合镀层的塔菲尔极化曲线。从图 4 中可知,当镀液搅拌速度在 600 r/min 时,复合镀层腐蚀电位最接近正值,腐蚀电流密度最小,搅拌速度为 200 r/min 时,

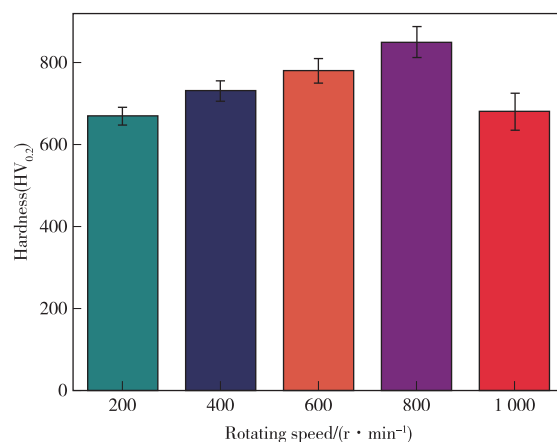


图 3 纳米复合镀层硬度

Fig. 3 Hardness of nano-composite coating

其腐蚀电位最低,腐蚀电流密度最大,根据电化学原理可知腐蚀电位越接近于 0,其腐蚀倾向越小,腐蚀电流密度越大,其耐蚀性越差,因此当镀液搅拌速度在 600 r/min 时,复合镀层耐蚀性最好。造成耐蚀性差别的主要原因是镀层的微观结构不同,结合图 2 可知,当镀液搅拌速度在 600 r/min 时,复合镀层表面纳米粒子相对弥散性以及结构致密性较好,同时其表面微孔较少,因此降低了腐蚀介质对复合镀层的腐蚀速率。搅拌速度为 800 r/min 时,虽然复合镀层表面的纳米粒子沉积量最多,但沉积量多的纳米粒子容易形成团聚,加剧了复合镀层表面电偶腐蚀,且从图 2 可知该条件下的复合镀层表面微孔较多,容易形成腐蚀通道。表 1 为不同搅拌速度下 LA141 镁锂合金表面纳米复合镀层的极化曲线参数。

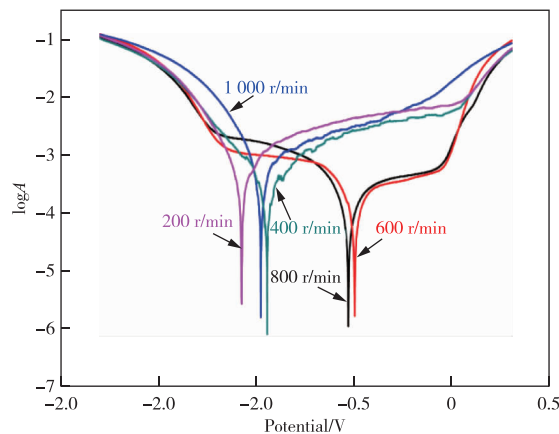


图 4 纳米复合镀层塔菲尔极化曲线

Fig. 4 Tafel polarization curve of nano-composite coating

表 1 纳米复合镀层塔菲尔曲线电化学参数

Table 1 Tafel curve electrochemical parameters of nanocomposite coating

Stirring speeds/(r · min ⁻¹)	Corrosion potential/V	Corrosion current density/(A · cm ⁻²)
200	-1.079	9.495 × 10 ⁻⁵
400	-0.981	9.081 × 10 ⁻⁵
600	-0.502	3.850 × 10 ⁻⁵
80	-0.535	4.450 × 10 ⁻⁵
1 000	-0.949	8.778 × 10 ⁻⁵

2.4.2 交流阻抗

图 5 为 LA141 镁锂合金表面纳米复合镀层的交流阻抗谱。由图 5 可见,图谱在高频区和低频区分别出现一个容抗弧,但高频区的容抗弧半径明显都小于低频区的。此外从图 5 中可知,当镀液搅拌速度在 600 r/min 时,复合镀层在低频区的容抗弧半径最大且明显大于其他条件下的容抗弧半径,而当搅拌速度在 200 r/min 时,其低频区容抗弧半径最小,当搅拌速度为 400、800 及 1 000 r/min 时,容抗弧半径间于此二者之间。结合图 2 可知,镀液搅拌速度为 600 r/min 时,复合镀层表面的纳米粒子沉积量较多且弥散分布性较好,胞粒之间结合紧密,同时纳米粒子减少了腐蚀通道,因此可以推断出当镀液搅拌速度在 600 r/min 时,复合镀层表面的电子转移能力最低,电子转移电阻最大,表明镀层不容易失去电子,即该条件下复合镀层的耐蚀性最好。

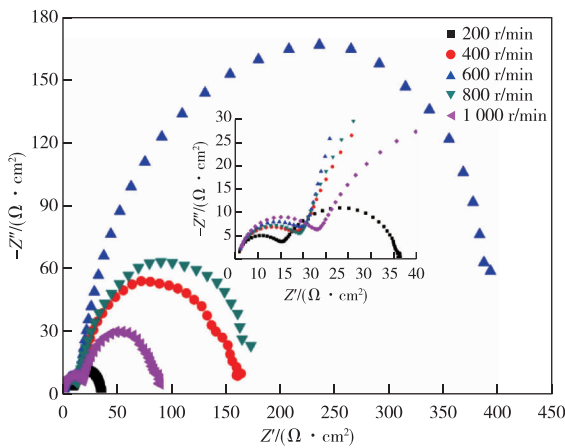


图 5 纳米复合镀层交流阻抗谱

Fig. 5 EIS of nanocomposite coating

图 6 为 LA141 镁锂合金表面纳米复合镀层的交流阻抗谱所对应的等效电路图,其中 R_s 表示溶液电阻, R_{po} 和 R_{ct} 分别表示涂层表面电阻和电荷转移电阻, Q_1 和 Q_2 表示理想电容元件。通过 Zsimp Win 拟合发现,当镀液搅拌速度为 600 r/min 时,复合镀层电荷转移电阻 R_{ct} 值最大,为 $403.6 \Omega \cdot \text{cm}^2$,涂层表面电阻 R_{po} 为 $15.6 \Omega \cdot \text{cm}^2$ 。

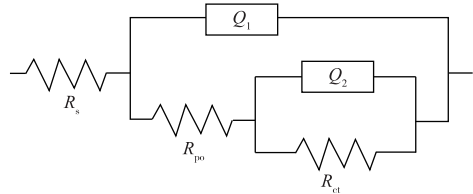


图 6 交流阻抗谱对应下的等效电路

Fig. 6 The equivalent circuits to nano-composite coating

2.5 搅拌速度对复合镀层耐磨性的影响

图 7 为 LA141 镁锂合金表面纳米复合镀层的摩擦系数随时间变化曲线。从图 7 中可知,当镀液搅拌速度为 200 r/min 时,复合镀层摩擦系数最大,稳定在 0.6~0.7;搅拌速度在 400 和 1 000 r/min 时,复合镀层摩擦系数在 0.45~0.6;搅拌速度为 600 和 800 r/min 时,复合镀层的摩擦系数相对较低,其值在 0.4~0.55 波动。因此可以判断出镀层在搅拌速度为 600 和 800 r/min 时其摩擦系数最低,结合图 2 可知,这是因为该条件下复合镀层表面的纳米粒子沉积量较多、相对弥散性较好,复合镀层的内应力较大,硬度值高,且在摩擦磨损的过程中纳米粒子可以起到润滑和承载相的作用。

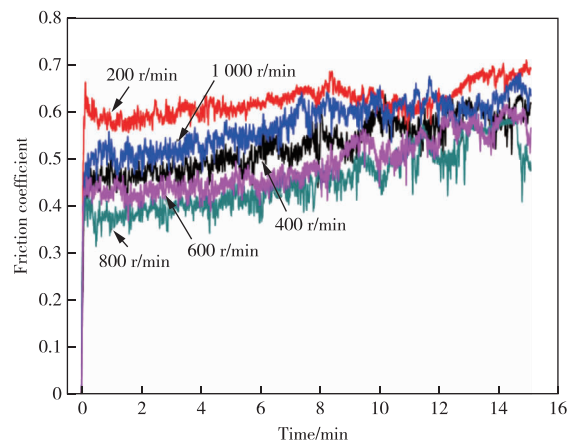


图 7 纳米复合镀层摩擦系数

Fig. 7 Friction coefficient of nano-composite coating

图 8 为 LA141 镁锂合金纳米复合镀层在不同搅拌速度下的摩擦磨损形貌。从图 8 中可知,当搅拌速度为 200、400 和 1 000 r/min 时,镀层表面磨损情况相对

较为严重,出现较多的凹坑和剥落痕迹,属于粘着磨损和磨粒磨损特征。由此可知,当复合镀层表面纳米粒子沉积量较少且弥散性较差时,镀层表面因纳米粒子的强化效应较小,硬度相对较低,在摩擦副的法向作用下,镀层开始发生塑性变形,沉积的纳米粒子与镀层微凸起部分在剪切力的作用下不断被剥落而产生磨屑。随着磨损的继续进行,镀层产生的磨屑开始发生粘着,由于镀层表面纳米粒子沉积量较少,产生的润滑和支撑作用较小,因此磨屑在摩擦副的作用下对镀层开始持续磨损,部分磨屑在磨损的过程中形成磨粒,对镀层进行磨粒磨损,因此磨痕表面出现凹坑和剥落痕迹,同时,在磨损的过程中由于复合镀层部分地方因纳米粒子的强化效应降低,因此在磨痕表面会生成裂纹。该条件下复合镀层的磨损机制主要为磨粒磨损。

当镀液搅拌速度达到 600 和 800 r/min 时,镀层磨损情况减轻,表面无严重的剥落和凹坑,磨痕表面分布着大量的粘着痕迹,其磨损形式主要以粘着磨损为主,但 800 r/min 下的复合镀层磨痕存在部分磨粒磨损痕迹。因此可知,当镀层表面纳米粒子沉积量较多且弥散性较好时,镀层因纳米粒子的强化效应增强,其硬度增加,在摩擦副的法向作用下,其塑性变形倾向变小,且由于纳米粒子的沉积量相对增加,在磨损的过程中,纳米粒子可以更好地起到润滑和支撑作用,因此磨痕表面主要以粘着痕迹为主。但镀液搅拌速度在 800 r/min 下,复合镀层表面微孔相对较多,导致镀层在磨损过程中粗糙度相对较大,因此在其表面出现少量凹坑和剥落痕迹。该条件下复合镀层的磨损机制主要为粘着磨损。

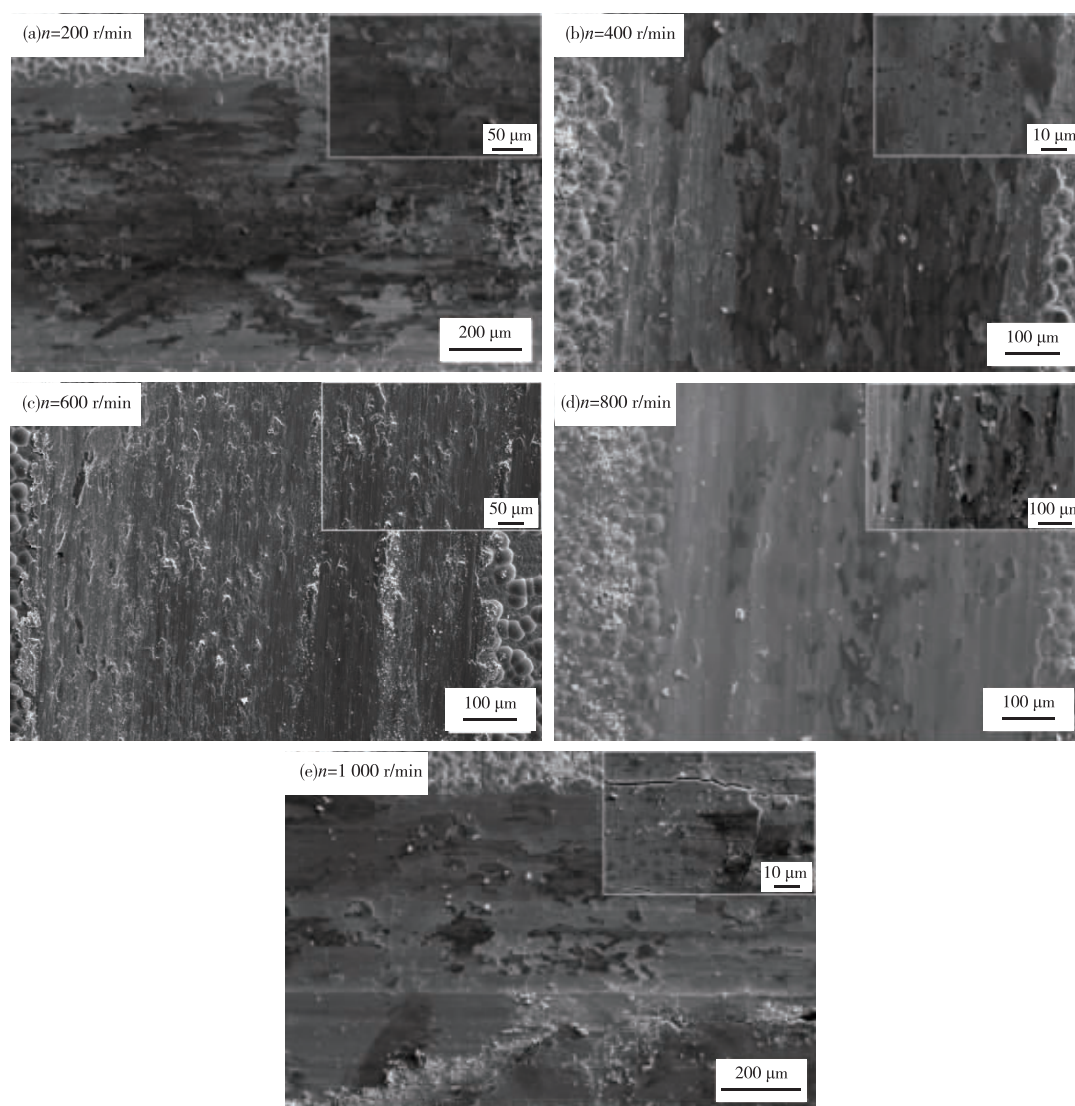


图 8 纳米复合镀层摩擦磨损形貌

Fig. 8 Friction and wear morphology of nano-composite coating

由于LA141镁锂合金纳米复合镀层磨损量少且磨痕深度浅,因此采用磨痕宽度和摩擦系数来对比其耐磨性。根据图8可知,复合镀层的磨痕宽度分别分820、810、790、750和840 μm ,结合镀层摩擦系数可知,当镀液搅拌速度为800 r/min时,其复合镀层的耐磨性最好。

3 结论

1) LA141镁锂合金表面纳米复合镀层主要以非晶结构为主,镀液搅拌速度影响复合镀层表面结构,并随着搅拌速度的增加,复合镀层表面的纳米沉积量先增加后减少,当搅拌速度为800 r/min时,复合镀层表面的纳米粒子沉积量最多、分散均匀,但表面微孔较多。

2) 镀液搅拌速度为600 r/min时,LA141镁锂合金复合镀层的耐蚀性最好,其腐蚀电位和腐蚀电流密度分别为-0.502 V和 $3.85 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ 。

3) 镀液搅拌速度为800 r/min时,LA141镁锂合金复合镀层硬度最高,达到850.7 HV_{0.2},其摩擦系数和磨痕宽度最小,分别为0.4~0.55和750 μm ,其磨损机制主要以粘着磨损为主。

参考文献:

- [1] 冯凯,李丹明,何成旦,等. 航天用超轻镁锂合金研究进展[J]. 特种铸造及有色合金,2017,37(2):140-143.
FENG Kai, LI Danming, HE Chengdan, et al. Research progress of ultralight magnesium-lithium alloys for aerospace[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2017, 37(2):140-143.
- [2] 阚洪敏,祝珊珊,冯筱珺,等. 室温电沉积制备铝镁合金的研究进展[J]. 中国材料进展,2017,36(1):58-62.
KAN Hongmin, ZHU Shanshan, FENG Xiaojun, et al. Research progress of electrodeposition Al-Mg alloy at room temperature[J]. Materials China, 2017, 36(1):58-62.
- [3] 蔡祥,乔岩欣,许道奎,等. 镁锂合金强化行为研究进展[J]. 材料导报,2019,33(增刊2):374-379.
CAI Xiang, QIAO Yanxin, XU Daokui, et al. Research progress in mechanical properties strengthening of Mg-Li alloy[J]. Materials Reports, 2019, 33(S2):374-379.
- [4] 王保杰,姜春龙,李传强,等. 镁锂合金腐蚀行为研究进展[J]. 航空材料学报,2019,39(1):1-8.
WANG Baojie, JIANG Chunlong, LI Chuanqiang, et al. Research progress of corrosion behavior of magnesium-lithium alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2019, 39(1):1-8.
- [5] 郭晓光,解海涛,刘旭贺,等. LZ91镁锂合金化学镀镍[J]. 表面技术,2016,45(12):43-49.
GUO Xiaoguang, XIE Haitao, LIU Xuhe, et al. Electroless nickel plating process of LZ91 magnesium-lithium alloy[J]. Surface Technology, 2016, 45(12):43-49.
- [6] SUN Y H, WANG R C, PENG C Q, et al. Corrosion behavior and surface treatment of superlight Mg-Li alloys[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2017, 27(7):1455-1475.
- [7] 张密林,埃尔金 F M. 镁锂超轻合金[M]. 北京:科学出版社,2010.
ZHANG Milin, ELKIN F M. Magnesium lithium ultra-light alloy [M]. Beijing: Science Publishing House, 2010.
- [8] LI Z, YUAN Y, SUN P, et al. Ceramic coatings of LA141 alloy formed by plasma electrolytic oxidation for corrosion protection[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2011, 3(9):3682-3690.
- [9] YIN T, WU R, LENG Z, et al. The process of electroplating with Cu on the surface of Mg-Li alloy[J]. Surface & Coatings Technology, 2013, 225:119-125.
- [10] 张密林. 超轻镁锂合金设计、制备与表面技术[J]. 黑龙江冶金,2014,34(1):1-6.
ZHANG Milin. Design, preparation and surface technology of superlight Mg-Li alloys[J]. Heilongjiang Yejin, 2014, 34(1):1-6.
- [11] 杨黎晖,李言涛,蔡国伟,等. 镁锂合金表面防护的最新研究进展[J]. 电镀与涂饰,2014,33(7):302-305.
YANG Lihui, LI Yantao, CAI Guowei, et al. The latest research progress of magnesium-lithium alloy surface protection [J]. Electroplating & Finishing, 2014, 33(7):302-305.
- [12] 史丽萍,赵世海. Ni-P基纳米化学复合镀研究进展[J]. 电镀与精饰,2014,36(1):34-35.
SHI Liping, ZHAO Shihai. Researching progress on Ni-P based nano-composite coating by electroless plating[J]. Plating & Finishing, 2014, 36(1):34-35.
- [13] HU R, SU Y, LIU Y, et al. Deposition process and properties of electroless Ni-P-Al₂O₃ composite coatings on magnesium alloy[J]. Nanoscale Research Letters, 2018, 13(1):198-205.