

AZ91D 镁合金表面环境友好 直接化学镀镍工艺研究

Process of environmentally-friendly direct
electroless nickel plating on AZ91D
magnesium alloy surface

宿 辉¹, 刘 辉¹, 张春波²

(1 黑龙江工程学院 材料与化学工程学院, 哈尔滨 150050;

2 哈尔滨中飞新技术股份有限公司, 哈尔滨 150060)

SU Hui¹, LIU Hui¹, ZHANG Chun-bo²

(1 College of Materials and Chemical Engineering, Heilongjiang

Institute of Technology, Harbin 150050, China; 2 Harbin

Zhongfei New Technology Co., Ltd.,

Harbin 150060, China)

摘要: 为高效、环保地提高镁合金的耐蚀、耐磨性能。采用无氟、无铬、无氰、无锌直接化学镀镍方法, 在 AZ91D 镁合金表面制备耐蚀、耐磨沉积层。利用 SEM, EDS, XRD 及电化学工作站等分别表征沉积前后镁合金表面的形貌、成分、物相及性能。结果表明: 主盐-还原剂比例为 1 : 1.4, 络合剂浓度为 $16 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、pH=7、温度为 $(85 \pm 0.5) \text{ }^\circ\text{C}$, 镁合金表面沉积层平整、致密, 由细小、均匀的胞状组织组成, 主要成分为 Ni, P, 其中 Ni 含量为 85.25% (质量分数), 为非晶态结构。镁合金硬度由 72HV (基体) 提高到 285HV, 腐蚀电位由 -1.524 V (基体) 提高到 -0.513 V , 腐蚀电流密度降低了约 3 个数量级。基体与沉积层间结合力良好, 无起皮、脱落现象, 沉积层厚度约为 $38 \mu\text{m}$ 。

关键词: 镁合金; 直接化学镀; AZ91D; 环境友好; 耐蚀性

doi: 10.11868/j.issn.1001-4381.2019.000977

中图分类号: TG178 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2020)08-0163-06

Abstract: In order to improve the corrosion resistance and wear resistance of magnesium alloy efficiently and environmentally, the corrosion resistant and wear resistant coating were prepared on AZ91D magnesium alloy by direct electroless nickel plating without fluorine, chromium, cyanogen and zinc. The surface morphology, composition, phase and corrosion resistance properties were characterized and compared by SEM, EDS, XRD and electrochemical workstation respectively. The results show that the coatings are smooth and compact, consisting of fine and uniform cellular structure being mainly composed of 85.25% (mass fraction) amorphous Ni and P in the ratio of main salt to reductant is 1 : 1.4, complexing agent concentration is $16 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, pH=7 and the temperature is $(85 \pm 0.5) \text{ }^\circ\text{C}$. The hardness is increased from 72HV of substrate to 285HV. Corrosion potential is enhanced from -1.524 V (substrate) to -0.513 V , meanwhile the corrosion current density is decreased by about 3 orders of magnitude. The cohesion between the substrate and the deposition layer is good without peeling and falling off, and the thickness of the deposition layer is approximately $38 \mu\text{m}$.

Key words: magnesium alloy; direct electroless plating; AZ91D; environmentally friendly; corrosion resistance

镁作为最轻的金属结构材料, 具有密度低、比强度高、弹性模量大等优势, 被誉为“21 世纪的绿色工程材

料”^[1-3]。但镁质软、硬度低且具有很高的化学活性极易腐蚀, 在室温下镁与空气中氧所形成的 MgO 膜层,

疏松而多孔,不能阻止镁基体的继续腐蚀;在腐蚀介质中镁易和合金元素、杂质等构成腐蚀电池,导致电偶腐蚀等,这些都严重制约了镁及镁合金的广泛应用^[4-7],对镁合金进行适当的表面处理可以提高其耐蚀及耐磨性能。目前采用的表面处理主要有化学镀、电镀、化学转化膜等,其中化学镀技术以其设备投资少、不需外加电源、不受工件形状限制等优势受到关注^[8-11]。与铁基材料相比,镁合金化学性质活泼,易氧化,属于难镀金属,故其前处理过程、施镀工艺显得尤其重要^[12-16]。葛昆等^[16]采用 $200 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CrO}_3$ 酸洗、 $385 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1} 40\% \text{ HF}$ 活化,在镁合金表面实现了化学镀镍,提高了镁合金的耐蚀性。但 Cr^{6+} 有毒且污染环境,可引起人呼吸困难、休克、肝损害及急性肾功能衰竭等,对人体有致癌作用。 HF 具有极强的腐蚀性,能强烈地腐蚀金属、玻璃等物体,吸入蒸汽或皮肤接触会造成难以治愈的灼伤。管秀荣等^[17]研究了 AZ91D 镁合金浸锌后化学镀镍,实验结果显示浸锌后的镍层致密、耐蚀;Chen 等^[18]对比了一次浸锌、二次浸锌对镁合金化学镀镍的影响,发现二次浸锌后的镍层更致密,但工艺步骤较多。综上所述,目前工艺虽然提高了镁合金的耐蚀性,但存在步骤相对烦琐,沉积层质量欠佳,采用 CrO_3 、 HF 等污染环境、危害人体健康的试剂等不足^[16-19]。

本工作通过与 CrO_3 、 HF 的对比实验,确定了无铬、无氟前处理工艺^[20],这里将在此工艺的基础上进一步研究无氰、无锌的直接化学镀镍技术,确定最佳镀液配方及工艺条件,高效、环保地提高镁合金耐蚀性、耐磨性。

1 实验材料与方法

采用 AZ91D 镁合金为基体,尺寸为 $10 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$,成分如表 1 所示。镁合金化学镀镍前必须进行前处理,此过程包括:试样打磨→碱洗→酸洗→活化。打磨采用 $600\# \sim 1000\#$ 金相砂纸,碱洗采用 NaOH 和 NaCO_3 混合液。酸洗可除去基体表面的金属杂质及氧化膜,提高镀层和基体间的结合程度;活化可提高镀层的结合力,防止过腐蚀。前期经对比实验确定 $10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Na}_2\text{MoO}_4$, $100 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1} \text{ H}_3\text{PO}_4$ 替代 CrO_3 酸洗, $20 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaOH}$, $20 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Na}_2\text{MoO}_4$ 替代 $40\% \text{ HF}$ 活化^[20]。前处理各步骤间需要去离子水清洗。镁合金化学镀镍:称取主盐 $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ $15 \sim 25 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、还原剂 $\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ $20 \sim 30 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、络合剂 $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ $10 \sim 20 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}$ $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、稀土及表面活性剂等适量,分别

用蒸馏水溶解,不断搅拌下加入,用氨水调节 pH 值至 $6 \sim 8$,待用。将前处理后镁合金基体加入镀液中,保持温度为 $70 \sim 90 \text{ }^\circ\text{C}$,施镀过程持续 $1 \sim 2 \text{ h}$ 。

表 1 AZ91D 镁合金化学成分(质量分数/%)

Table 1 Chemical compositions of AZ91D magnesium alloy (mass fraction/%)

Al	Zn	Mn	Mg
8.9-9.1	0.6	0.2	Bal

采用 SU 8010 型扫描电子显微镜观察镀层的形貌;X/Max 50 mm^2 型能谱仪测定镀层的成分;X'Pert PRO X 射线衍射仪分析镀层的物相;沉积速率采用单位时间、单位面积试样表面质量的增加量表示,即沉积速率 = 镀层质量 / (面积 × 施镀时间);按照 GB/T 5270—1985 测试镀层的结合力;采用 NaCl 溶液测定镀层的孔隙率;采用 HDX-1000TB 数显维氏硬度计测试镀层硬度,载荷为 25 N ,时间为 20 s ;通过 VersaSTAT 3 电化学工作站测定镀层的 Tafel 曲线,测试采用三电极体系:以铂片为辅助电极,饱和甘汞电极为参比电极,镁合金试样为工作电极,裸露面积为 1 cm^2 ,腐蚀溶液为 3.5% (质量分数,下同)的 NaCl 溶液。

2 结果与分析

2.1 镀液配方确定

2.1.1 主盐-还原剂比例对沉积速率的影响

选取 $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 为主盐, $\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 为还原剂。主盐-还原剂比例和沉积速率的关系如图 1 所示,对镀层外观、孔隙率和结合力的影响见表 2。从图 1 可见,随主盐-还原剂比例增大,沉积速率出现先增后降的趋势。化学镀层的外观出现了漏镀、腐蚀、平整、起泡的过程,孔隙率先由大变小再逐渐增大,镀层结合力也出现类似的变化(见表 2)。这是因为,随着

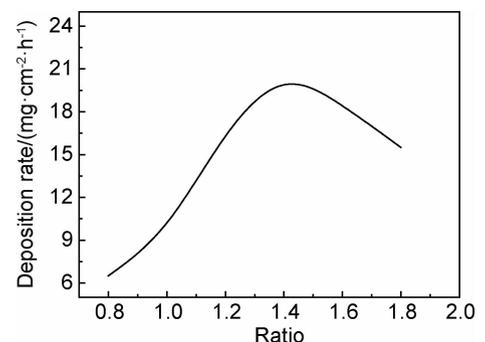


图 1 主盐-还原剂比例-沉积速率关系曲线

Fig. 1 Relation curve of ratio of main salt-reducing agent vs deposition rate

表 2 主盐-还原剂比例与镀层外貌、孔隙率及结合力

Table 2 Ratio of main salt and reducing agent vs coating appearance, porosity and adhesion

Ratio	Coating appearance	Porosity/%	Adhesion
1 : 1.0	With leakage plating, the substrate is corroded	90	—
1 : 1.2	Slight corrosion of base	30	General
1 : 1.4	Smooth	0	Good
1 : 1.6	Smooth	10	Good
1 : 1.8	Bubble	30	General

还原剂浓度的增加,离子碰撞速率加快, Ni^{2+} 在活化基体表面沉积成 Ni 的动力增大,从而提高了沉积速率,但沉积速率过快时镀层的结合力下降,镀液易发生分解,且当次亚磷酸钠的浓度过高时, H_2PO_2^- 与 Ni^{2+} 生成 $\text{Ni}(\text{H}_2\text{PO}_2)_2$ 沉淀,使沉积速率降低。故得出主盐-还原剂的最佳比例为 1 : 1.4。

2.1.2 络合剂浓度对沉积速率的影响

随着镀液中 Ni^{2+} 不断被还原, HPO_3^{3-} 生成量不断增多,容易产生 NiHPO_3 沉淀而引起镀液分解。络合剂可与 Ni^{2+} 形成稳定的络合物,起到抑制 NiHPO_3 生成的作用,使镀液具有良好的稳定性。本实验选用 $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 为络合剂,络合剂浓度与沉积速率的关系如图 2 所示。由图 2 可见,随着络合剂浓度的增大,镀液的稳定性增强,但与此同时沉积速率降低,充分显示了沉积速率与镀液稳定性二者之间的矛盾。考虑上述因素的影响,选取 $16 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 为宜。

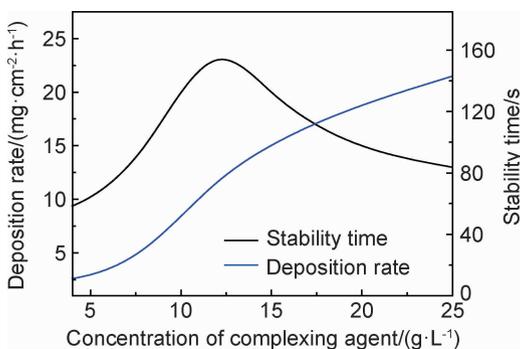


图 2 络合剂浓度和沉积速率、镀液稳定性的关系曲线

Fig. 2 Relation curves of concentration of complexing agent vs deposition rate and bath stability

2.2 工艺参数

2.2.1 pH 值

pH 值对沉积速率的影响如图 3 所示。由图 3 可见,随着 pH 值增加,沉积速率出现了先增后减的趋势,当 pH 值为 7 时沉积速率出现最大值。随镀液 pH 值增加,镀层的外观出现由较灰暗、粗糙到平整、光亮、再到

腐蚀的过程;镀层的孔隙率出现先由大变小再稍微增大的过程;镀层的结合力也在 pH 值为 7 时达到最佳。

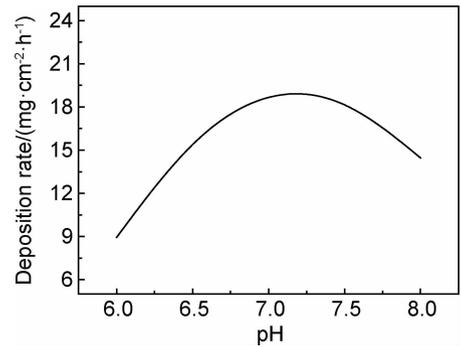


图 3 pH 值和沉积速率的关系曲线

Fig. 3 Relation curve of pH vs deposition rate

2.2.2 温度

温度是影响化学镀镍的重要因素。图 4 为温度和沉积速率的关系曲线,由图 4 可见,随着温度的增加,沉积速率不断提高,当达到一定值后下降。化学镀层外观出现腐蚀、平整、起泡等现象,镀层孔隙率出现由减小到增大的过程。这可能是由于温度过低,沉积速率太慢,基体发生腐蚀;温度太高,反应过于剧烈,镀层结合力差,镀液易分解。故温度控制在 $(85 \pm 0.5) \text{ } ^\circ\text{C}$ 左右。

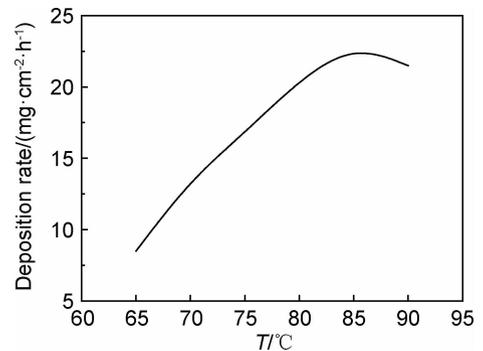


图 4 温度和沉积速率的关系曲线

Fig. 4 Relation curve of temperature vs deposition rate

2.3 化学镀层

在主盐-还原剂比例为 1 : 1.4 (取 $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ $20 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ $28 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$), $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ $16 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{CH}_4\text{N}_2\text{S}$ $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,稀土及表面活性剂等适量,pH 值为 7,温度 $(85 \pm 0.5) \text{ } ^\circ\text{C}$ 条件下,在 AZ91D 镁合金表面制备了 Ni-P 镀层,并进行如下表征。

2.3.1 镀层的形貌与组成

图 5 为镁合金基体化学镀镍前、后的微观形貌。由图 5(a)可见,化学镀镍前镁合金基体表面有明显的条痕,这是金相砂纸打磨所致;由图 5(b)可见,化学镀

镍后,基体表面覆盖着较平整、致密的镀层,条痕不复出现,镀层由细小、均匀、致密的胞状组织组成,表明镁合金基体已经完全被镀层覆盖。为确定镀层的成分,

对镀镍后镁合金进行 EDS 分析,图 5(c)为图 5(b)中选区的 EDS 分析。由图 5(c)可知镀层的主要成分为 Ni-P,其中 Ni 含量为 85.25%,P 含量为 14.75%。

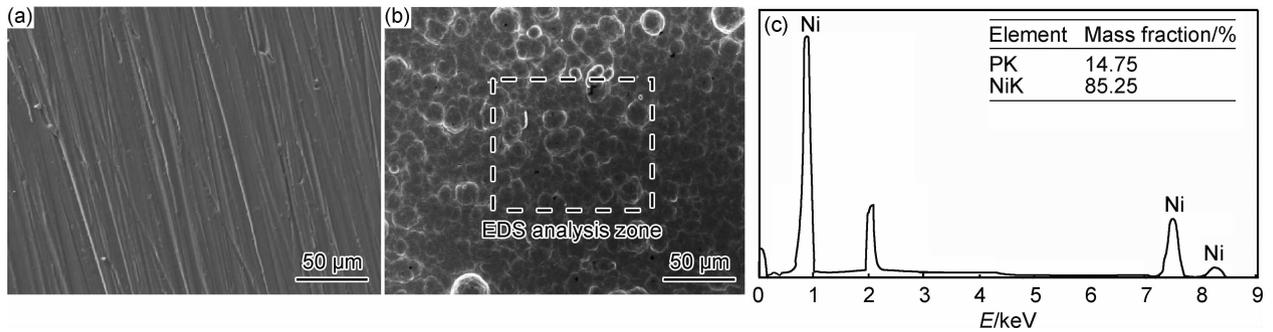


图 5 化学镀镍前(a)、后(b)镁合金表面的 SEM 图和 EDS(c)分析

Fig. 5 SEM images of magnesium alloy before(a) and after(b) electroless nickel plating and EDS analysis(c)

图 6 为镁合金化学镀镍后的 XRD 谱图。由图 6 可见, $2\theta=45^\circ$ 处出现一宽化峰包,说明镁合金镀层呈非晶态结构,与理论上非晶态 Ni-P 合金的衍射峰一致 (PDF No. 45-1027)。表明得到了较完整的非晶态镍磷合金镀层,也预示着此化学镀层具有优异的力学性能。

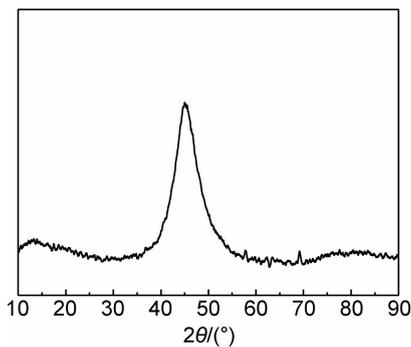


图 6 镁合金化学镀镍后的 XRD 谱图

Fig. 6 XRD pattern of magnesium alloy after electroless nickel plating

2.3.2 镀层的性能

(1) 硬度

镀层的硬度决定镀层的耐磨性和抗冲击性,是衡量镀层质量的重要指标。使用 HDX-1000TB 硬度计测试镁合金施镀前后的维氏硬度,每个试样分别取 3~5 个测试点,取平均值。镀前镁合金基体的平均硬度为 72HV,镀后镁合金的平均硬度为 285HV,硬度明显提高,约是基体硬度的 4 倍。

(2) 结合力

由 EDS 谱得到镀层的成分为 Ni-P,其中 Ni 含量为 85.25%,P 含量为 14.75%。镀层有一定的脆性,因此有必要测试镀层与基体组织间的结合强度。按照

国家标准 GB/T 5270-1985,通过测试镀层与基体间的结合力来评价结合强度。用锉刀实验法检测镀层与基体的结合力,结果发现镀层无起皮、脱落现象,说明镀层与基体间结合力良好。图 7 为镁合金表面 Ni-P 镀层截面的 SEM 图,由图 7 可见,镀层与镁合金基体间咬合紧密、结合良好,镀层厚度约为 $38\ \mu\text{m}$,在组织结构上预示着镀层具有良好的耐蚀性。图 8 为镀层所含 Mg, Ni, P 元素的 EDS 面扫描,由图 8 可见, Ni-P 镀层明显、致密地镀覆在镁合金表面,结合力良好。

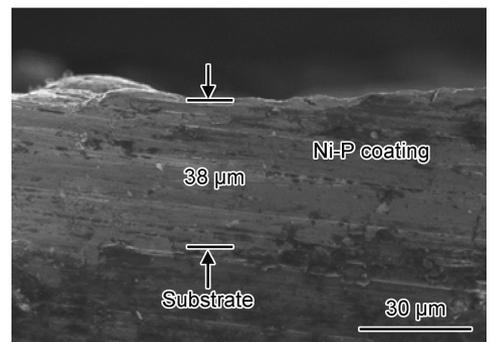


图 7 镁合金表面 Ni-P 镀层截面的 SEM 图

Fig. 7 SEM image of Ni-P coating section on magnesium alloy surface

(3) 耐蚀性

采用电化学工作站 Tafel 曲线研究化学镀镍前、后镁合金的耐蚀性能,如图 9 所示。由图 9 可见,镁合金化学镀镍后,腐蚀电位显著正移,镁合金基体的腐蚀电位约为 $-1.524\ \text{V}$,镀层的腐蚀电位约为 $-0.513\ \text{V}$,相比镁合金基体提高了 66%,同时腐蚀电流密度较基体降低了约 3 个数量级,见表 3。由表 3 可见,直接化学镀镍工艺较大程度提高了镁合金的耐蚀性,较含锌

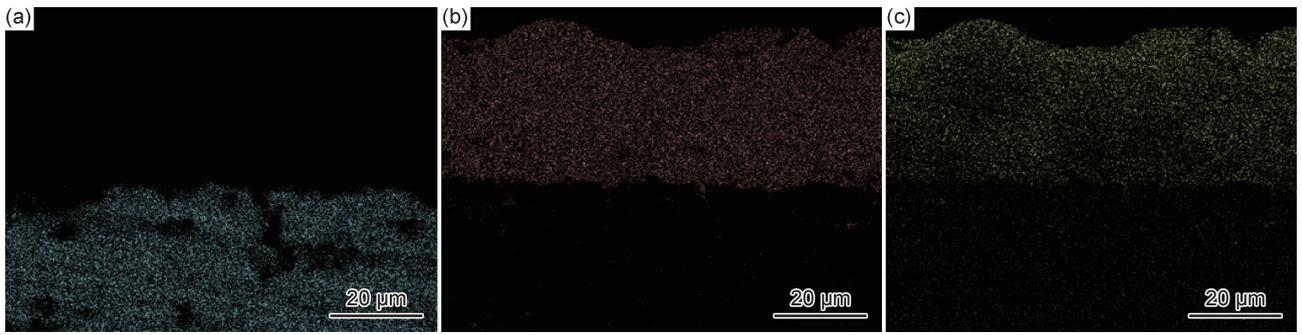


图 8 镁合金表面 Ni-P 镀层截面的 EDS 面扫描 (a)Mg;(b)Ni;(c)P

Fig. 8 EDS mapping of Ni-P coating section on magnesium alloy surface (a)Mg;(b)Ni;(c)P

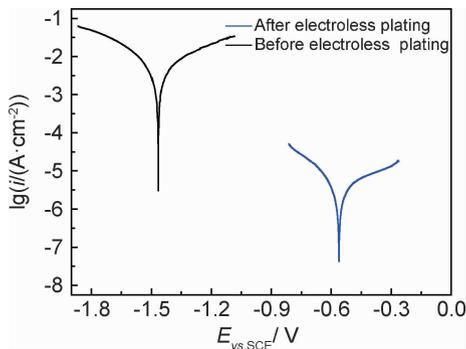


图 9 镁合金基体化学镀镍前后的 Tafel 曲线

Fig. 9 Tafel curves of magnesium alloy substrate before and after electroless nickel plating

表 3 不同试样的腐蚀电位及腐蚀电流密度

Table 3 Corrosion potential and current density of different samples

Sample	$E_{\text{vs SCE}}/\text{V}$	$\lg(i/(\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}))$
Magnesium alloy substrate	-1.524	2.1×10^{-2}
Coating on magnesium alloy	-0.513	6.2×10^{-5}

工艺所得镀层的耐蚀性偏高,即所制备的 Ni-P 镀层对镁合金基体具有良好的保护作用。

3 结论

(1)确定了基于环境友好镁合金直接化学镀镍的最佳工艺条件: $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O} : \text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O} = 1 : 1.4, \text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O} 16 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, pH 值为 7, 温度 $(85 \pm 0.5)^\circ\text{C}$ 。

(2)镀层致密、均匀,由细小的胞状组织组成,主要成分为 Ni, P, 其中 Ni 含量为 85.25%, P 含量为 14.75%,为非晶态结构。镀层厚度约为 $38 \mu\text{m}$,与基体间结合良好。

(3)化学镀镍后镁合金的耐蚀、耐磨性能明显提高,硬度较基体提高了约 4 倍;腐蚀电位较基体提高了 66%,腐蚀电流密度降低了约 3 个数量级。

参考文献

- [1] JIAN S Y, CHU Y R, LIN C S. Permanganate conversion coating on AZ31 magnesium alloys with enhanced corrosion resistance [J]. Corrosion Science, 2015, 93(4): 301-309.
- [2] 朱亚利, 范伟博, 冯利邦, 等. 超疏水镁合金表面的防黏附和耐腐蚀性能[J]. 材料工程, 2016, 44(1): 66-70.
ZHU Y L, FAN W B, FENG L B, et al. Anti-adhesion and corrosion resistance of superhydrophobic magnesium alloy surface[J]. Journal of Materials Engineering, 2016, 44(1): 66-70.
- [3] ZENG R C, ZHANG J, HUANG W J, et al. Review of studies on corrosion of magnesium alloys [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2006, 16(2): 763-771.
- [4] 王志申, 孙志华, 王强, 等. ZM6 铸造镁合金微弧氧化膜层性能研究[J]. 材料工程, 2015, 43(10): 55-59.
WANG Z S, SUN Z H, WANG Q, et al. Performance of micro arc oxidation coating of ZM6 cast magnesium alloy [J]. Journal of Materials Engineering, 2015, 43(10): 55-59.
- [5] 刘军, 张金玲, 渠治波, 等. 稀土 Gd 对 AZ31 镁合金耐蚀性能的影响[J]. 材料工程, 2018, 44(6): 73-79.
LIU J, ZHANG J L, QU Z B, et al. Effect of rare earth Gd on corrosion resistance of AZ31 magnesium alloy [J]. Journal of Materials Engineering, 2018, 44(6): 73-79.
- [6] SONG G, ATRENS A. Recent insights into the mechanism of magnesium corrosion and research suggestions [J]. Advanced Engineering Materials, 2007, 9(3): 177-183.
- [7] 万天, 宋述鹏, 王今朝. 生物医用镁合金腐蚀行为的研究进展[J]. 材料工程, 2020, 48(1): 19-26.
WAN T, SONG S P, WANG J Z, et al. Research progress in corrosion behavior of biomedical magnesium alloys [J]. Journal of Materials Engineering, 2020, 48(1): 19-26.
- [8] SADREDDINI S, AFSHAR A, AHMADI-JAZANI M. Tribo-logical properties of Ni-P-SiO₂ nanocomposite coating on aluminum [J]. Colloid Journal, 2015, 77(5): 628-634.
- [9] XIE Z H, CHEN F, XIANG S R, et al. Studies of several pickling and activation processes for electroless Ni-P plating on AZ31 magnesium alloy [J]. Journal of the Electrochemistry Society, 2015, 162(3): 115-123.
- [10] GUTSEV D, ANTONOV M, HUSSAINOVA I, et al. Effect of SiO₂ and PTFE additives on dry sliding of Ni-P electroless coat-

- ing[J]. Tribology International, 2013, 65(5): 295-302.
- [11] 宿辉, 张春波, 王作凯, 等. 镁合金表面化学镀镍前处理工艺的研究进展[J]. 表面技术, 2017, 46(9): 87-94.
SU H, ZHANG C B, WANG Z K, et al. Research progress of pretreatment process for electroless nickel plating on magnesium alloy surface[J]. Surface Technology, 2017, 46(9): 87-94.
- [12] LIU J J, WANG X D, TIAN Z Y, et al. Effect of copper content on the properties of electroless Ni-Cu-P coatings prepared on magnesium alloys[J]. Applied Surface Science, 2015, 356(4): 289-293.
- [13] AMBAT R, ZHOU W. Electroless nickel-plating on AZ91D magnesium alloy; effect of substrate microstructure and plating parameters[J]. Surface and Coatings Technology, 2004, 179(2): 124-134.
- [14] XIE Z H, YU G, LI T J, et al. Dynamic behavior of electroless nickel plating reaction on magnesium alloys[J]. Journal of Coatings Technology and Research, 2012, 9(1): 107-114.
- [15] SHARTAL K M, KIPOUROS G J. Electroless nickel phosphorus plating on AZ31[J]. Metallurgical and Materials Transactions: B, 2009, 40(2): 208-222.
- [16] 葛昆, 侯华, 赵宇宏. 中温碱性镁合金化学镀镍研究[J]. 中国铸造装备与技术, 2014(3): 41-43.
GE K, HOU H, ZHAO Y H. Electroless Ni-P plating on magnesium alloy in alkaline solution with medium temperature[J]. China Foundry Machinery & Technology, 2014(3): 41-43.
- [17] 管秀荣, 朱宏达, 史敬伟, 等. 镁合金浸锌前处理对化学镀镍层的影响[J]. 表面技术, 2018, 47(4): 140-144.
GUAN X R, ZHU H D, SHI J W, et al. The influence of zinc-dipping pretreatment technological conditions on the electroless nickel coating on magnesium alloy [J]. Surface Technology, 2018, 47(4): 140-144.
- [18] CHEN J L, YU G, HU B N, et al. A zinc transition layer in electroless nickel plating [J]. Surface and Coatings Technology, 2010, 201(3/4): 686-690.
- [19] QIN T N, MA L Q, YAO Y, et al. An *in situ* measure method to study deposition mechanism of electroless Ni-P plating on AZ31magnesium alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(12): 2790-2797.
- [20] 宿辉. AZ91D 镁合金表面无铬无氟前处理工艺研究[J]. 电镀与精饰, 2019, 41(1): 10-14.
SU H. Study on chromium-free and fluorine-free pretreatment process of AZ91D magnesium alloy[J]. Plating and Finishing, 2019, 41(1): 10-14.

基金项目: 哈尔滨市应用技术与开发“优秀学科带头人 A 类”项目 (2016RAXXJ043)

收稿日期: 2019-10-27; 修订日期: 2020-03-26

通讯作者: 宿辉(1971—), 女, 教授, 博士, 主要从事材料表面技术的研究工作, 联系地址: 黑龙江省哈尔滨市红旗大街 999 号黑龙江工程学院 (150050), E-mail: xh123456_71@163.com

(本文责编: 杨 雪)