

锡酸盐转化前处理对镁合金化学镀镍镀层的影响

胥钧耀^{a,b}, 冯燕朋^a, 于媛媛^a, 张丁非^{a,b}, 蒋斌^{a,b}, 潘复生^{a,b}

(重庆大学 a.材料科学与工程学院 b.国家镁合金材料工程技术研究中心, 重庆 400044)

摘要: **目的** 利用锡酸盐转化膜中间层避免化学镀镍镀层与金属基体的直接接触, 降低其产生原电池腐蚀的趋势, 提高镁合金化学镀镍层的耐蚀性及稳定性。 **方法** 采用锡酸盐化学转化膜技术在 AZ31 镁合金表面制备锡酸盐转化膜层, 然后通过直接化学镀镍技术在该膜层上沉积 Ni-P 镀层。利用 SEM、EDS、浸泡析氢、电化学测试等手段, 研究了复合镀层的显微结构、相组成、耐蚀性。 **结果** 锡酸盐转化膜由细小均匀的球形颗粒堆积而成, 颗粒之间存在空隙, 为直接化学镀镍时镍磷的初始沉积提供了可能。化学转化膜表面沉积的化学镀镍层均匀致密, 形成典型的胞状结构。基体-化学转化膜-化学镀 Ni-P 合金层三者之间的结合良好, 保证了复合镀层优良的耐蚀性能。 **结论** 化学镀 Ni-P 层能够在不经过钎活化处理的条件下直接在锡酸盐转化膜上沉积, 锡酸盐转化膜中间层避免了 Ni-P 阴极性镀层与阳极性镁基体的直接接触, 降低了 Ni-P 镀层局部缺陷对整体防护效果的影响, 提高了镀层的耐蚀性及耐久性。

关键词: 镁合金; 锡酸盐转化膜; 化学镀镍; 耐蚀性; 复合镀层; 电化学测试

中图分类号: TQ153 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)03-0034-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.03.005

Effects of Stannate Chemical Conversion Pretreatment on Electroless Nickel Plating of Magnesium Alloy

XU Jun-yao^{a,b}, FENG Yan-peng^a, YU Yuan-yuan^a, ZHANG Ding-fei^{a,b}, JIANG Bin^{a,b}, PAN Fu-sheng^{a,b}

(a.School of Materials Science and Engineering, b.National Engineering Research Center for Magnesium Alloys, Chongqing 400044, China)

ABSTRACT: The work aims to adopt middle layer of stannate conversion film to avoid the direct contact between electroless nickel plating coating and metal matrix, so as to reduce the trend of the galvanic corrosion and improve the corrosion resistance and stability of electroless nickel plating coating of magnesium alloy. The stannate chemical conversion film (SCC) was prepared on AZ31 magnesium alloy by stannate chemical conversion film technology and then the Ni-P coating was deposited on SCC layer by direct electroless nickel plating technology. The microstructure, phase composition and corrosion resistance of composite coatings were studied by SEM, EDS, Hydrogen Evolution Reaction test, electrochemical test, etc. The SCC film was composed of small uniform spherical particles, and there was a gap between the particles, which provided a possibility for the initial deposition of Ni-P alloy during the direct electroless nickel plating process. The electroless Ni-P coating deposited on the

收稿日期: 2018-11-26; 修订日期: 2019-01-14

Received: 2018-11-26; Revised: 2019-01-14

基金项目: 国家重点研发计划资助 (2016YFB0301101); 国家自然科学基金资助项目 (51571040, 51531002, 51201190); 中央高校基本科研业务费 (106112017CDJPT130003)

Fund: National Key R&D Program of China (2016YFB0301101), National Natural Science Foundation of China (51571040, 51531002, 51201190), Fundamental Research Funds for the Central Universities (106112017CDJPT130003)

作者简介: 胥钧耀 (1979—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为新合金设计、表面工程。邮箱: junyaoxu@cqu.edu.cn

Biography: XU Jun-yao (1979—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: alloying design, surface engineering. E-mail: junyaoxu@cqu.edu.cn

surface of the SCC film was uniform and dense with a typical cellular structure. The combination of matrix-chemical conversion film-electroless Ni-P alloy layer was good, which ensured the excellent corrosion resistance of the composite coating. The electroless Plating Ni-P coating can be deposited directly on the SCC film without palladium-activated treatment. The middle layer of the SCC film avoids the direct contact between the Ni-P alloy cathodic coating and the anodic magnesium matrix, reduces the influence of the local micro-defects of the Ni-P coating on the overall protection effect and improves the corrosion resistance and durability of the coating.

KEY WORDS: magnesium alloy; stannate chemical conversion film; electroless nickel plating; corrosion resistance; composite coating; electrochemical test

在能源与环保问题日益严峻的今天,轻质材料的作用与贡献越来越受到重视。作为最轻的金属结构材料,镁合金具有比强度和比刚度高,铸造性能、电磁屏蔽性能、阻尼减震性能和导热性能好,易回收等一系列优良的物理性能和资源上的优势,因此受到了工业界的广泛欢迎,成为近年来金属材料科学领域的研究热点之一^[1-3]。但是,相比同属轻质金属材料的铝、钛合金,镁合金在开发和应用上尚处于起步阶段。此外,镁合金的化学活性高、耐蚀性差的问题严重阻碍了它在实际工业生产中的广泛应用。因此,提高其耐蚀性成为全世界镁合金研究的难点及重点之一^[4-6]。

目前,提高镁合金耐蚀性的主要手段可分为两大类:一类是提高镁合金产品自身的耐蚀性能,例如减少镁合金中的有害杂质元素^[7]、细化晶粒^[8-9]、提高合金的纯度及研究开发新合金等;另一类就是目前最有成效的表面涂覆技术。镁合金的表面涂覆技术多种多样,其中,研究比较成熟、应用较广的有(电)化学镀^[10-11]、化学转化处理^[12]以及阳极氧化(微弧氧化^[13]),而化学转化和阳极氧化处理尽管在一定程度上能起到防护效果,但是其防护周期短、表面硬度低、耐磨性差等缺点难以克服。相较而言,如果能够通过(电)化学镀在镁基体上施镀结构致密、表面硬度高且具有良好导电能力的金属性涂层,将极大地推动镁及其合金在类似 3C 电子产品等领域的应用。但是,镁的标准电极电位很低,具有很高的化学反应活性,使其成为一种难以直接进行电镀(或化学镀)的金属,目前开发的镁合金(电)化学镀工艺仍然存在结合力差、难以保证镀层无孔、处理工艺复杂以及电化学镀液带来的重金属污染等许多难以克服的问题。更为严重的

是,所镀的 Ni-P 合金镀层相对于镁合金基体而言是阴极性防护镀层,镀层的任一微小缺陷都将引起阳极性基体的腐蚀加速。因此,工业界对于 Ni-P 镀层在镁合金上的应用始终顾虑重重。

为了避免镀层与基体的接触,部分研究者提出了增加中间层的思路,比如微弧氧化+化学镀镍^[14-15],或化学转化膜+化学镀镍^[16]等复合的方法,但是这些方法为了在不具备催化活性的中间层上镀上 Ni-P 合金层,都应用了钯活化的催化工艺,增加了工艺的复杂性及操作成本。此外,简单吸附在中间层上的钯粒子也容易在化学镀的过程中进入镀液中,引起镀液的快速反应直至镀液“中毒”失效。因此,本文尝试将化学转化处理的试样直接浸入化学镀镍镀液中施镀,发现 Ni-P 镀层完全能够在不经过钯活化处理的条件下直接在锡酸盐转化膜上沉积,得到的复合镀层相比于直接化学镀镍工艺的单一镀层的耐蚀性更为优良。

1 试验

1.1 样品制备

基体材料为挤压态的 AZ31 镁合金棒材。样品经线切割加工成 $\phi 20\text{ mm}\times 1\text{ mm}$ 的圆形薄片,靠近边缘的地方钻有 $\phi 2\text{ mm}$ 的小孔,方便施镀时悬挂试样于镀液中。试样经砂纸打磨至 1200#后,经蒸馏水冲洗,再在酒精中超声清洗 30 min,冷风吹干后置于干燥箱内待用。锡酸盐化学转化膜及化学镀镍所用的溶液,均由分析纯化学试剂和蒸馏水配制。

锡酸盐转化膜工艺参数见表 1。转化膜施镀完成后,将试样从转化膜镀液中取出,然后立即放入预热

表 1 锡酸盐转化膜工艺参数
Tab.1 Process and technological parameters of stannate chemical conversion coating

| Porcess | Solution composition | Process parameter |
|------------------------------|--|-------------------|
| Ultrasonica degreasing | Ethanol absolute | Ambient, 10 min |
| Alkaline cleaning | NaOH 50 g/L | 60~65 ℃, 10 min |
| Rinsing | Deionized water | Ambient |
| Acid pickling | 0.9%HCl+0.9%HF | Ambient, 20 s |
| Ringsing | Deionized water | Ambient |
| Stannate chemical conversion | Na ₂ [Sn(OH) ₆] 40 g/L, Na ₄ P ₂ O ₇ 40 g/L, CH ₃ COONa 10 g/L, NaOH 10 g/L | 80 ℃, 90 min |
| Rinsing and drying | Deionized water | |

至 85 ℃ 的镀镍溶液中, 施镀时间 2 h。化学镀镍液组成为: 主盐硫酸镍 25 g/L, 还原剂次亚磷酸钠 30 g/L, 络合剂柠檬酸 5 g/L, 乳酸 15 g/L, 缓冲剂氟化氢铵 10 g/L。用适量氨水将镀液的 pH 值调节至 6.5 左右。

1.2 性能测试及组织观察

采用 VEGA3 TESCAN 型扫描电子显微镜 (SEM) 对镀层表面及剖面进行微观分析, 采用仪器自带的能谱仪 (EDS) 对镀层的化学成分进行半定量分析。耐腐蚀性能分别由浸泡析氢试验和动电位极化曲线测试进行评估, 浸泡析氢试验装置见参考文献[16]。电化学腐蚀测试采用经典三电极电解体系, 在 CHI660E 电化学工作站上进行。其中饱和甘汞电极为参比电极, 1.5 cm×1.5 cm 的铂网电极为对电极, 待测试样为工作电极, 工作面积为 1.0 cm², 测试用腐蚀液为 3.5% (质量分数) NaCl 溶液。动电位极化曲线测试在开路电位稳定后进行, 扫描速率为 1 mV/s。

2 结果及分析

2.1 锡酸盐化学转化膜

化学转化膜, 又叫做金属转化膜, 是金属表面的原子与介质中的阴离子发生化学反应, 在金属基体表面生成的一层附着力良好的薄膜。铬酸盐转化膜是镁合金表面最常用的转化方法, 其工艺非常成熟, 转化膜性能也很稳定, 应用时间较长, 已实现工业化生产。但是铬酸盐中的六价铬离子有毒, 对人体健康有害, 对环境也有污染。同铬酸盐相比, 锡酸盐转化液具有无毒、无污染、成本较低等优点。

镁合金锡酸盐转化膜呈银灰色, 图 1 所示为镁合金锡酸盐转化处理 1.5 h 后的表面形貌。从图可以清楚地看出, 锡酸盐转化膜由细小的近球形 (类鹅卵石状) 颗粒堆积而成, 颗粒直径为 3~6 μm, 膜层较为均匀、平整, 但颗粒之间有一定的缝隙。这些缝隙的

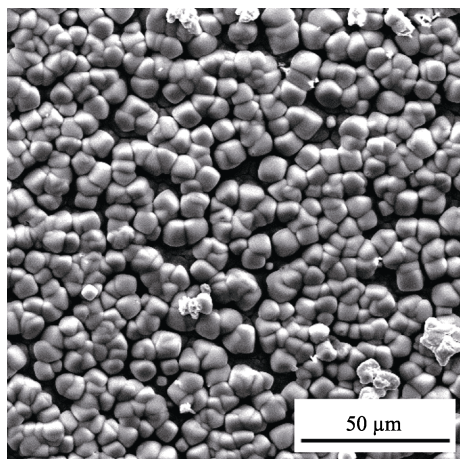


图 1 镁合金锡酸盐转化膜的表面形貌
Fig.1 Microstructure of stannate chemical conversion coating on Mg alloy

存在, 让腐蚀介质容易渗入镀层直达镁基体, 使得锡酸盐转化膜自身的耐腐蚀性难以持久。但正是由于缝隙的存在, 才为后续处理 (喷涂、化学镀、电镀等) 提供了良好的吸附条件, 而且可以依靠在锡酸盐转化膜和化学镀 Ni-P 层间牢靠的机械咬合作用, 得到结合力较好的复合镀层。

2.2 锡酸盐转化膜上直接化学镀镍

图 2 为锡酸盐转化膜快速转移至化学镀镍溶液中施镀 10 min 的样品表面形貌图。从图中可以看出, 即使不经过钎活化处理, 在化学镀 10 min 后, 也有少量 Ni-P 合金在锡酸盐转化膜表面形核生长, 形核的位置基本上是颗粒间的缝隙处。图中 B 点能谱结果显示, 大块的颗粒为锡酸镁, 在锡酸镁颗粒缝隙处, 颜色衬度相对亮色一点的区域填充着小颗粒的 Ni-P 合金 (图中 A 点)。究其原因, 应该是锡酸盐转化膜缝隙位置所暴露出来的镁基体与化学镀液中的 Ni²⁺ 发生置换反应, 置换出来的 Ni 金属颗粒就近吸附在缝隙处, 形成镍基核。而一旦形成镍基核, 其所具有的自催化性将促使 Ni-P 合金源源不断以平面生长的模式沉积在试样表面, 最终形成致密而平整的化学镀镍层。

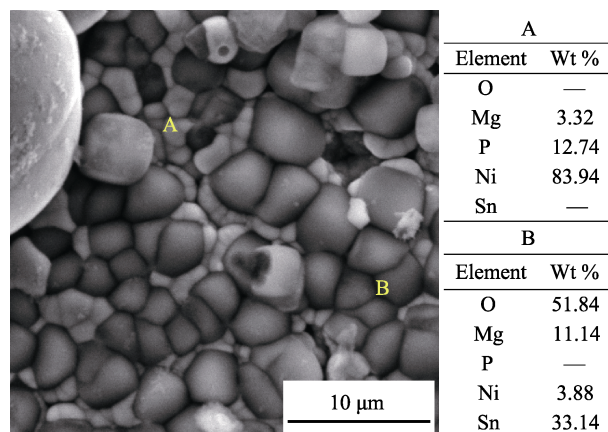


图 2 锡酸盐转化膜上化学镀镍施镀 10 min 的表面形貌及能谱结果

Fig.2 Microstructure of SCC coating with Ni-P plating for 10 min and EDS results

直接在锡酸盐转化膜上沉积 Ni-P 合金, 所得到的复合镀层的表面形貌和剖面形貌如图 3 所示。从图 3a 可以看出, 最外层的镍磷镀层均匀致密, 呈典型的化学镀镍胞状结构, 小胞在生长过程中相互融合形成大胞, 胞界面缺陷很少, 紧密堆积。从镀层的纵切面 (图 3b) 可以看出, 整个镀层分为明显的两层结构。从 EDS 图谱中可以确定, 内层为锡酸盐转化膜, 外层为镍磷镀层。转化膜层很薄, 仅有 5~8 μm, 施镀 4 h 后, 镍磷镀层较厚, 大约有 70~80 μm, 且镀层致密, 从剖面图中没有看到孔洞或缝隙等缺陷。此外, 从图 3b 中也可以看出, 相比于转化膜层的起伏不平, 后续施镀的化学镀镍层具有明显的后期整平效应, 体现出良好的均镀能力。

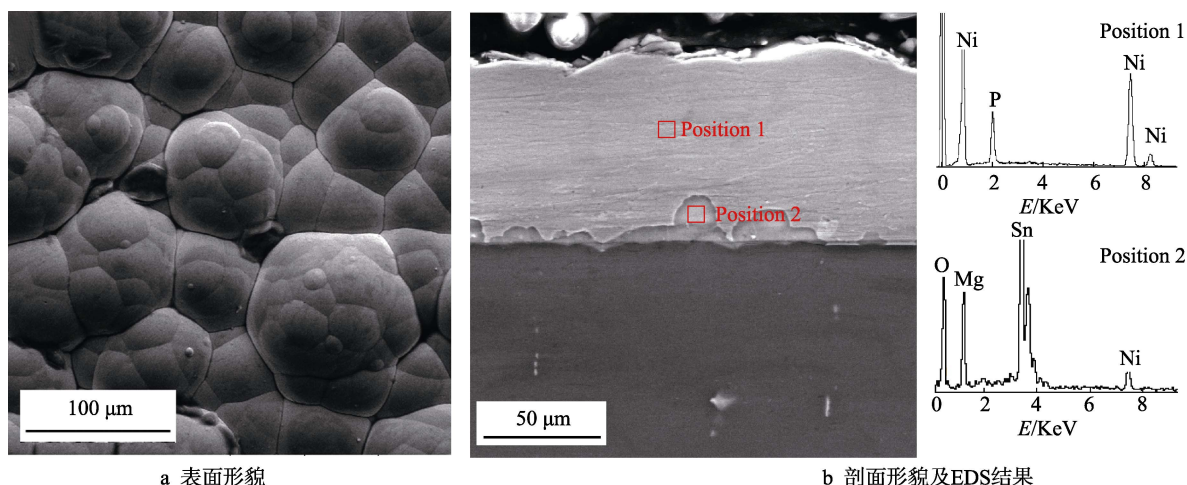


图 3 化学镀 4 h 的复合镀层的表面形貌和剖面形貌以及剖面上不同位置的 EDS 结果

Fig.3 Morphologies of surface (a) and cross-section (b) of composite coating after 4 h electroless plating and the EDS results

2.3 镀层的耐蚀性测试

2.3.1 浸泡析氢测试

图 4 所示为 AZ31 基体、锡酸盐转化膜、直接化学镀镍层及转化膜+化学镀镍复合镀层四种试样在 3.5% NaCl 溶液中的浸泡析氢测试结果。从图中可以看出, 基体试样的腐蚀速率最大, 析氢量达到 $0.0580 \text{ mL}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$, 析氢曲线接近直线, 其腐蚀速率不随时间而变化, 表明 AZ31 样品在浸泡过程中产生的附着在其表面的腐蚀产品完全没有保护作用, 腐蚀介质可以自由通过腐蚀产物直达基体, 使其腐蚀过程源源不断进行。化学转化膜试样析氢速率其次, 为 $0.0054 \text{ mL}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$, 相比基体提升了一个数量级。化学转化膜试样开始腐蚀比较缓慢, 浸泡后期, 腐蚀速率稍有加快。究其原因应该是多孔隙的转化膜层难以提供持久的耐蚀性, 随着膜层的破坏, 暴露出来的镁基体也越多, 腐蚀也就随之加剧。直接化学镀试样和复合镀试样腐蚀速率均较慢, 分别为 $0.00213 \text{ mL}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$ 和 $0.00086 \text{ mL}/(\text{cm}^2 \cdot \text{h})$, 特别是复合镀层的析氢速率相比基体提升了两个数量级。直接化学镀试样在浸泡 100 h 后, 镀层边缘开始破裂, 镁基体很快被腐蚀。原因是镀层边缘为化学镀的薄弱区域, 该区域可能存在缺陷和应力, 在浸泡腐蚀过程中, 优先发生破裂。镀层破裂后, NaCl 溶液渗透到镁基体表面, 在镁基体和镍磷镀层之间形成原电池腐蚀, 使腐蚀速率迅速增加。复合镀试样耐蚀性最好, 浸泡 100 h 后, 仅边缘微小区域有色变现象, 绝大部分仍然保持原有状态。

图 5 是四种试样在 3.5% 的 NaCl 溶液中浸泡 100 h 后的照片。可以很清楚地看出每个样品的腐蚀情况。空白试样腐蚀最严重, 表面发生全面腐蚀, 且伴有明显的点蚀坑。锡酸盐转化处理后的试样表面仅有很小区域发生了点蚀。直接化学镀镍试样的镍磷镀层出现严重破损现象, 而复合镀镍试样基本完好。

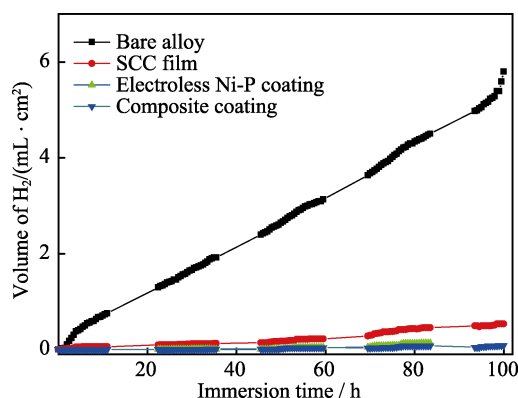
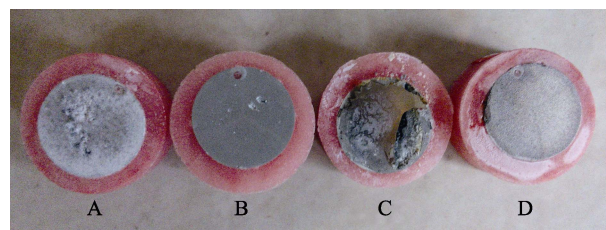


图 4 试样在 3.5%NaCl 溶液中的析氢曲线

Fig.4 Volume of H_2 evolution of samples in 3.5% NaCl solution



A—Bare Mg alloy; B—SCC film; C—Ni-P coating; D—Composite coating

图 5 试样在 3.5% 的 NaCl 溶液中浸泡 100 h 后的表面形貌

Fig.5 Morphologies of samples after immersion in 3.5% NaCl solution for 100 h

2.3.1 电化学腐蚀测试

图 6 和表 2 所示为不同表面状态的四中样品在 3.5%NaCl 溶液中的动电位极化测试结果。从图表中可以看出, 镁基体和化学转化膜试样的变化趋势相同, 当所加电压在阴极支时, 主要发生析氢反应, 在阴极过程中, 试样表面无明显变化; 当所加电压增加到阳极支时, 可以看到, 随着所加电压的增加, 极化电流也随之增加, 说明基体试样和锡酸盐转化膜试样都没有发生钝化效应。但化学转化膜试样的腐蚀电位

有所提高, 腐蚀电流密度也有所减小, 说明锡酸盐化学转化膜提高了镁基体的耐蚀性。化学镀镍和复合镀层试样的变化趋势基本相同, 当所加电压增加到阳极支时, 可以看到, 随着电压的增加, 极化电流增加较小或基本不增加, 这说明直接化学镀镍镀层和复合镀镍镀层发生了明显的钝化效应, 对镁合金基体提供了较好的防护效果。结合图 5 结果可以看出, 直接化学镀镍虽然具有良好的防护效果, 但是其防护性能与镀层的致密完整性密切相关, 一旦在使用过程中镀层表面出现缺陷, 将带来更为严重的腐蚀后果。相比而言, 复合镀层试样的腐蚀电位最高, 腐蚀电流密度最小, 说明其耐蚀性比直接化学镀层好, 且耐久性也更好 (图 5 中 D)。这是由于锡酸盐转化膜中间层可以避免镁基体和 Ni-P 合金层的直接接触, 即使在外层的 Ni-P 层偶有细微缺陷产生, 也不会发生剧烈的原电池腐蚀, 从而提高了镁合金的耐蚀性及耐久性。

表 2 试样的电化学参数
Tab.2 Electrochemical parameters of samples

| Sample | E_{corr}/V | I_{corr}/A |
|----------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Bare Mg alloy | -1.287 | 8.584×10^{-4} |
| SCC coating | -1.081 | 8.429×10^{-5} |
| Electroless Ni-P plating coating | -0.536 | 1.788×10^{-6} |
| Composite coating | -0.395 | 1.463×10^{-6} |

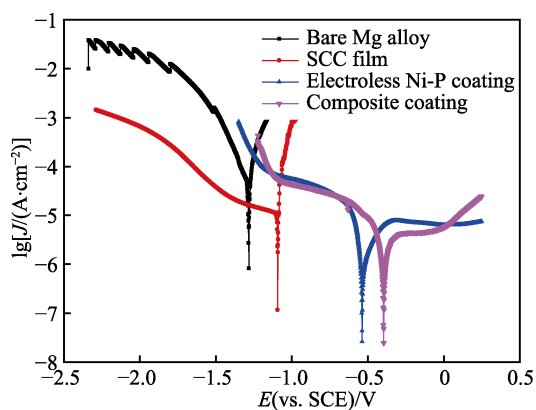
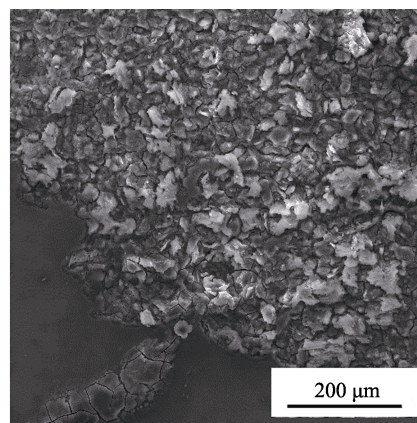
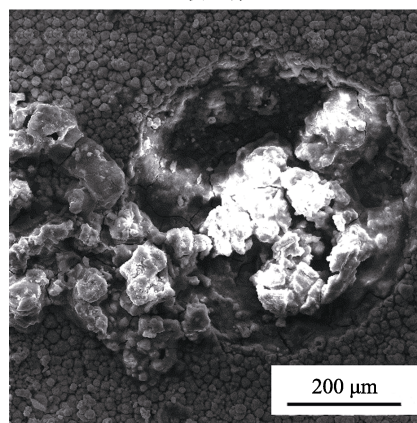


图 6 试样的极化曲线
Fig.6 Polarization curves of samples

图 7 是经过动电位极化测试后的试样表面形貌。对于基体试样, 初始的腐蚀形态为点蚀, 随着所加电压的增加, 腐蚀形态由多处的点蚀逐渐发展, 最终连成一片, 形成全面腐蚀。锡酸盐转化处理后的试样, 腐蚀形态开始仍为点蚀, 随着电压的增加, 点蚀区域逐渐扩展, 但是其发展过程明显受到颗粒状镀层的限制, 并没有连接成片, 而是单个点蚀坑继续往宽度及深度方向发展。而直接化学镀和复合镀层样品的表面在经过短暂的动电位极化曲线测试后, 均没有观察到腐蚀现象, 表现出良好的耐蚀性。



a 镁基体



b 锡酸盐转化膜

图 7 动电位极化测试后的表面形貌
Fig.7 Surface morphologies of samples after electrochemical test: a) bare Mg alloy; b) SCC film

3 结论

1) 锡酸盐转化处理后, 镁基体表面沉积上一层由细小、均匀的近球形颗粒堆积而成的转化膜。镀层颗粒间有一定的空隙, 为后续镍磷合金的沉积提供了良好的形成条件, 也有助于提高镀层与基体的结合力。

2) 镍磷镀层可以在不经过钎活化处理的条件下在锡酸盐转化膜上直接沉积, 所得镀层均匀且致密, 呈典型的胞状组织。转化膜层使镀镍层与镁基体分隔开, 避免或减少了原电池腐蚀的发生几率, 因此复合镀层表现出优异的耐蚀性和耐久性。

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, 2008, 21(5): 313-328.
- [2] PAN F S, YANG M B, CHEN X H. A review on casting magnesium alloys: Modification of commercial alloys and development of new alloys[J]. Journal of materials sci-

- ence and technology, 2016, 32(12): 1211-1221.
- [3] MO N, TAN Q, BIRMINGHAM M, et al. Current development of creep-resistant magnesium cast alloys: A review[J]. Materials and design, 2018, 155: 422-442.
- [4] SONG G L, ATRENS A. Corrosion mechanisms of magnesium alloys[J]. Advanced engineering materials, 2010, 1(1): 11-33.
- [5] 张新, 张奎. 镁合金腐蚀行为及机理研究进展[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2015, 27(1): 78-84.
ZHANG X, ZHANG K. Magnesium alloy corrosion behavior and mechanism were reviewed[J]. Corrosion science and protection technology, 2015, 27(1): 78-84.
- [6] XU W, BIRBILIS N, SHA G, et al. A high-specific-strength and corrosion-resistant magnesium alloy[J]. Nature materials, 2015, 14(12): 1229.
- [7] 陈先华, 王敬丰, 汤爱涛, 等. 杂质元素对镁合金组织与性能的影响及其对应措施[J]. 材料导报, 2010, 24(3): 37-41.
CHEN X H, WANG J F, TANG A T, et al. Impurity effect on microstructure and properties of magnesium alloys and neutralizing methods[J]. Materials review, 2010, 24(3): 37-41.
- [8] LIAO J, HOTTA M, YAMAMOTO N. Corrosion behavior of fine-grained AZ31B magnesium alloy[J]. Corrosion science, 2012, 61(4): 208-214.
- [9] 李鑫, 江静华, 赵永好, 等. 组织超细化对 ZK60 镁合金腐蚀行为的影响[J]. 腐蚀与防护, 2015, 36(11): 1030-1037.
LI X, JIANG J H, ZHAO Y H, et al. Effect of grain ultrafining on corrosion behavior of ZK60 Mg alloy[J]. Corrosion and protection, 2015, 36(11): 1030-1037.
- [10] 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(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(4): 140-144.
- [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.
XU 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] 曾荣昌, 兰自栋, 陈君, 等. 镁合金表面化学转化膜的研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(3): 397-404.
ZENG R C, LAN Z D, CHEN J, et al. Progress of chemical conversion coatings on magnesium alloys[J]. Chinese journal of nonferrous metals, 2009, 19(3): 397-404.
- [13] 曾云, 高欢, 张玉林, 等. 纯镁微弧氧化陶瓷层的耐蚀性能[J]. 材料热处理学报, 2016(S1): 125-129.
ZENG Y, GAO H, ZHANG Y L, et al. Corrosion resistance property of ceramic coating on pure Mg by micro-arc oxidation[J]. Transactions of materials and heat treatment, 2016(S1): 125-129.
- [14] 李均明, 薛晓楠, 王爱娟, 等. 镁合金微弧氧化预处理化学镀镍研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2012, 32(1): 23-27.
LI J M, XUE X N, WANG A J, et al. Electroless nickel plating of magnesium alloy with microarc oxidation pretreatment[J]. Journal of Chinese society for corrosion and protection, 2012, 32(1): 23-27.
- [15] 刘向艳, 郭锋, 李鹏飞, 等. 镁合金微弧氧化陶瓷层表面化学镀镍研究[J]. 表面技术, 2010, 39(5): 8-10.
LIU X Y, GUO F, LI P F, et al. Study on electroless nickel plating on micro-arc oxidation ceramics layer of magnesium alloy[J]. Surface technology, 2010, 39(5): 8-10.
- [16] HUO H, LI Y, WANG F. Corrosion of AZ91D magnesium alloy with a chemical conversion coating and electroless nickel layer[J]. Corrosion science, 2004, 46(6): 1467-1477.