

NiCl₂ 含量对电沉积 Ni-纳米 TiN 复合镀层过程的影响

李霖泰, 吴蒙华, 王元刚, 王邦国, 宁智

(大连大学 机械工程学院, 大连 116622)

摘要: **目的** 针对氨基磺酸镍体系镀镍液, 优化活化剂 NiCl₂ 的用量, 提高 Ni-纳米 TiN 复合镀层的性能。 **方法** 采用超声-脉冲电沉积工艺制备 Ni-纳米 TiN 复合镀层, 研究 NiCl₂ 含量对镀液的电导率及复合镀层的厚度、显微硬度、表面微观形貌等的影响。 **结果** 镀液的电导率及复合镀层的厚度、显微硬度均随 NiCl₂ 含量的增加呈现先增大、后减小的变化趋势。当 NiCl₂ 的用量为 30 g/L 时, 镀液的导电性能最佳, 电导率值为 61.3 mS/cm, 复合镀层的厚度及显微硬度均达到最大值, 分别为 84 μm 和 760HV, 并且复合镀层表面平整光滑, 晶粒尺寸最小。 **结论** NiCl₂ 含量对镀液及复合镀层的性能有很大影响, 适量的 NiCl₂ 可以防止阳极钝化, 提高镀液的导电能力及沉积速率, 使复合镀层的厚度增加, 显微硬度提高, 晶粒细化, 微观形貌获得改善, 性能提高。适宜的 NiCl₂ 用量为 30 g/L。

关键词: Ni-纳米 TiN 复合镀; 氨基磺酸镍; 氯化镍; 沉积速率; 镀层厚度; 显微硬度; 微观形貌

中图分类号: TQ153.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-3660(2015)09-0007-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.09.002

Influences of NiCl₂ Content on Electrodeposited Ni-Nano TiN Composite Coating Process

LI Lin-tai, WU Meng-hua, WANG Yuan-gang, WANG Bang-guo, NING Zhi

(School of Mechanical Engineering, Dalian University, Dalian 116622, China)

ABSTRACT: **Objective** To optimize the nickel chloride content, and improve the performance of Ni-nano TiN composite coatings for nickel sulfamate system electrolyte. **Methods** The effects of different nickel chloride content on the plating solution conductivity and the thickness, microhardness, surface microstructure of Ni-nano TiN composite coating prepared by ultrasonic-electrodepositing method were studied. **Results** The plating solution conductivity and the thickness, microhardness of the composite coating increased firstly and decreased afterwards with the increase of nickel chloride content. When the content of nickel chloride was 30 g/L, the bath conductivity was the best and the plating solution conductivity value was 61.3 mS/cm, the thickness of the composite coating reached the maximum value of 84 μm, the microhardness reached the maximum value of 760HV, at the same time, the composite coating surface was smooth and the grain size was minimal. **Conclusion** Nickel chloride content had a great influence on the per-

收稿日期: 2015-05-04; 修订日期: 2015-05-28

Received: 2015-05-04; Revised: 2015-05-28

基金项目: 辽宁省高等学校杰出青年学者成长计划项目(LJQ2012106)

Fund: Supported by the Liaoning Provincial University Growth Program of Distinguished Young Scholars(LJQ2012106)

作者简介: 李霖泰(1990—), 男, 山东人, 硕士生, 主要研究电化学加工技术。

Biography: LI Lin-tai(1990—), Male, from Shandong, Master graduate student, Research focus: electrochemical machining technology.

通讯作者: 吴蒙华(1963—), 男, 广东人, 教授, 博士生导师, 主要从事电化学加工技术的研究。

Corresponding author: WU Meng-hua(1963—), Male, from Guangdong, Professor, Doctoral tutor, Research focus: electrochemical machining technology.

formance of the plating solution and the composite coating. A suitable content of nickel chloride could prevent anodic passivation, increase the conductive ability of the plating solution, the deposition rate, and the thickness, microhardness of composite coating, refine the grains, and improve the microstructure and performance of Ni-nano TiN composite coating. The suitable content of nickel chloride was 30 g/L.

KEY WORDS: Ni-nano TiN composite coating; nickel sulfamate; nickel chloride; deposition rate; coating thickness; microhardness; microstructure

与传统瓦特镀镍液相比,氨基磺酸盐镀镍液具有分散与均镀能力强的优点,获得的镀层内应力低,极限强度高,沉积速度快,孔隙率低,具有很好的延展性。该技术适用的电流密度范围可达 $3 \sim 90 \text{ A/dm}^2$,能广泛应用于电铸、电路板印刷、模具制造和尺寸修复等行业^[1-3]。随着电镀与纳米技术的发展,在镀液中加入纳米颗粒而获得纳米复合镀层的相关研究和应用受到国内外学者的广泛关注。于明明等^[4]采用氨基磺酸镍体系镀镍液,在不锈钢基体上制备出 Ni-纳米 TiN 复合镀层,研究了超声波、脉冲电源参数及 TiN 浓度等工艺参数对复合镀层表面形貌的影响,并得到最佳工艺参数。薛玉君等^[5]采用直流电沉积、脉冲电沉积、超声辅助脉冲电沉积三种工艺制备 Ni-CeO₂ 纳米复合镀层,研究了电沉积方式对纳米复合镀层表面形貌、显微硬度和摩擦磨损性能的影响,其中以超声辅助脉冲电沉积获得的纳米复合镀层的性能最佳。吴蒙华等^[6]采用超声电沉积工艺在 45# 钢基体上制备 Ni-纳米 TiN 复合镀层,研究了不同热处理温度下复合镀层的硬度与磨损量。Tang Jun 等^[7]研究了氨基磺酸镍镀液、瓦特镀液以及氯化镍镀液三种体系中,加入不同添加剂对镀层力学性能的影响。

目前,有关电镀工艺参数对氨基磺酸镍体系镀镍层的影响研究较多,而有关阳极活化剂对复合镀层性能的影响鲜有报道。文中以氨基磺酸镍为主盐,保持其他实验参数不变,分析阳极活化剂 NiCl₂ 的含量对 Ni-纳米 TiN 复合镀层沉积速度、显微硬度、表面形貌等的影响,并获得最佳 NiCl₂ 含量,以进一步改善镀层性能,以期为氨基磺酸盐体系镀镍液中制备纳米复合镀层提供实验依据与参考。

1 实验

1.1 施镀

阴极选用尺寸为 40 mm×30 mm×3 mm 的 45# 钢;阳极选用纯度大于 99.99% 的电解镍板,其尺寸为 40 mm×60 mm×3 mm。阴阳极平行且对中放置,两者距

离为 60 mm。电沉积过程中,阴阳极只有相对面参与反应,其他部分绝缘保护。纳米 TiN 平均粒径为 20 ~ 30 nm。

镀层制备工艺流程为:水洗→有机溶剂除油→超声水洗→除锈→机械打磨→机械抛光→水洗→活化→水洗→超声脉冲电沉积→水洗→无水乙醇清洗→吹干。

施镀装置如图 1 所示。通过水浴加热将镀液温度控制在 45 ℃,机械搅拌速率为 280 r/min,超声功率为 200 W。脉冲方式为矩形波脉冲,脉冲电源占空比为 40%,平均电流密度为 4 A/dm²,电沉积时间为 90 min。

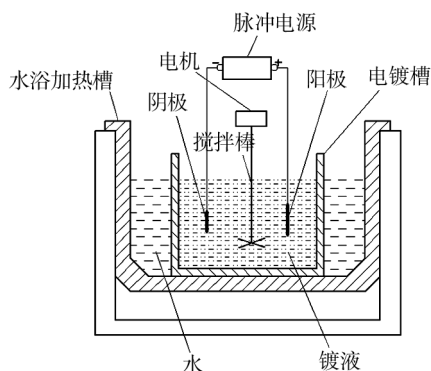


图 1 电沉积装置示意

Fig. 1 Electrodeposition apparatus sketch

镀液以氨基磺酸镍为主盐,pH 值为 4.0,其成分为:氨基磺酸镍 350 g/L,氯化镍 0,10,20,30,40 g/L,氮化钛 5 g/L,十二烷基硫酸钠 0.3 g/L,硼酸 30 g/L。

1.2 测试方法

- 1) 使用 DDSJ-318 型电导率仪测定镀液电导率。
- 2) 通过电火花线切割手段将试件切割成 5 mm×30 mm×3 mm 的小试样,对小试样的截面进行打磨、抛光,用 4% (体积分数) 的硝酸酒精溶液进行腐蚀,使用 JQX-S 型测量显微镜测试镀层厚度。
- 3) 用 TH763 型显微硬度仪测定镀层表面的显微硬度。硬度仪压头为正四棱锥体的维氏金刚石压头,

加载 0.1 kg, 加载时间为 5 s。取 5 个测量点的平均值作为测试结果。

4) 采用 EVO-MA-18 型扫描电子显微镜 (SEM) 观察镀层表面微观形貌。

2 结果与讨论

2.1 氯化镍含量对镀液导电性能的影响

金属镍具有强烈的钝化性能, 有电流通过时, 镍的钝化倾向会表现得更加强烈。当镀液中无活化剂或活化剂不足时, 随电流密度的增大, 阳极电位会急剧变正; 同时, 阳极表面会形成一层褐色的氧化膜, 析出大量氧, 从而发生钝化。镍阳极钝化后, 不能正常溶解, 镀液中的镍离子浓度降低, 氢离子浓度增加, 导致阴极电流效率下降, 使得镀层质量恶化。添加氯离子作为阳极活化剂, 可以防止镍阳极钝化, 确保镍阳极正常溶解, 使镀液中的镍离子浓度保持稳定。氯离子含量过低时, 作用不明显, 不能有效防止阳极钝化; 氯离子含量过高时, 会使阳极过度溶解而产生阳极泥, 污染镀液, 从而造成镀层粗糙, 有毛刺, 内应力增加, 质量受到影响^[8]。

图 2 为镀液电导率随氯化镍含量的变化情况。可以看出, 在氯化镍质量浓度达到 30 g/L 之前, 随着氯化镍含量的增加, 镀液的电导率逐渐提高; 超过 30 g/L 之后, 镀液的电导率略微有所下降。镀液的电导率主要与两个因素有关: 一为量的因素, 即能导电的离子的数量及离子所带的电荷数; 二为质的因素, 即离子运动的速度。开始时, 随着氯化镍含量的增加, 单位体积镀液中的离子数目增多, 镍阳极能够正常溶解, 镀液中消耗的镍离子能够得到及时补充, 此时离

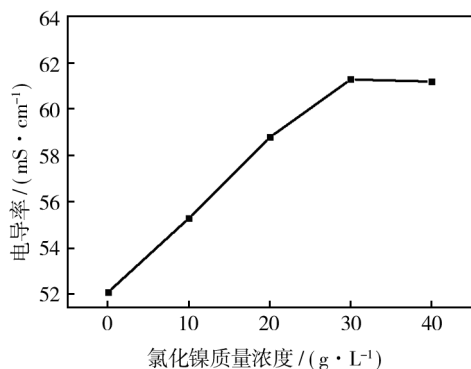


图 2 镀液电导率随氯化镍含量的变化

Fig. 2 Change of plating solution conductivity with the content of nickel chloride

子数量的影响占主导, 故导电率增加。当电镀液中离子浓度较高时, 离子间的静电作用增强, 使离子运动速度变慢, 此时质的因素起主要作用, 从而使镀液导电率下降^[9]。

在氯化镍含量不同的镀液中施镀, 每隔 15 min 记录镀液的电阻值 (由脉冲电源所显示的电压与电流计算), 结果见图 3。可以看出, 随着氯化镍含量的增加, 镀液的电阻逐渐降低, 说明氯化镍的加入能够降低镀液电阻。此外, 氯化镍含量不同的镀液在前 45 min 之内, 阻值基本都没有明显变化; 45 min 之后, 氯化镍质量分数为 0, 10, 20 g/L 的镀液阻值开始升高, 并且升高幅度随氯化镍浓度的增加有减缓的趋势, 说明阳极被钝化的程度依次减轻。当氯化镍质量浓度升高到 30, 40 g/L 时, 镀液的阻值不再降低, 且不随时间的变化而变化, 说明阳极未被钝化, 镍阳极的分解能够及时补充镀液中消耗的镍离子。

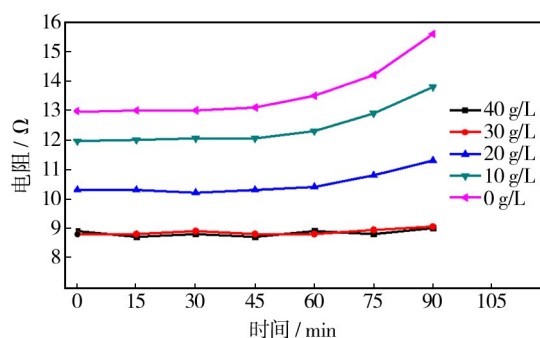


图 3 氯化镍含量不同的镀液电阻随时间的变化

Fig. 3 Change of plating solution resistance with time at different contents of nickel chloride

2.2 氯化镍含量对镀层厚度的影响

镀层截面形貌及厚度如图 4 所示。可以看到, 氯化镍质量浓度在 0 ~ 40 g/L 范围内时, 获得的镀层致密。用原瑞士 CSM 仪器股份有限公司生产的 Xpress Plus 型快速划痕测试仪在镀层表面划痕, 没有出现镀层起皮或破碎的情况, 这定性说明镀层与基体结合紧密。从图 4 中还可以看出, 随着镀液中氯化镍含量的增加, 镀层的厚度逐渐增加; 氯化镍质量浓度增至 30 g/L 时, 镀层厚度达到最大值; 氯化镍质量浓度继续增加至 40 g/L 时, 镀层的厚度又略有减小。分析认为, 氯化镍含量增加, 有效防止了阳极钝化膜的形成, 并且镀液的电导率逐渐提高, 使镀液分散能力提高^[9], 这样有利于共沉积的进行, 提高了沉积速率, 单位时间内共沉积到基体上的微粒数量增多, 所以镀层厚度逐渐增加。当氯化镍质量浓度超过 30 g/L 之后,

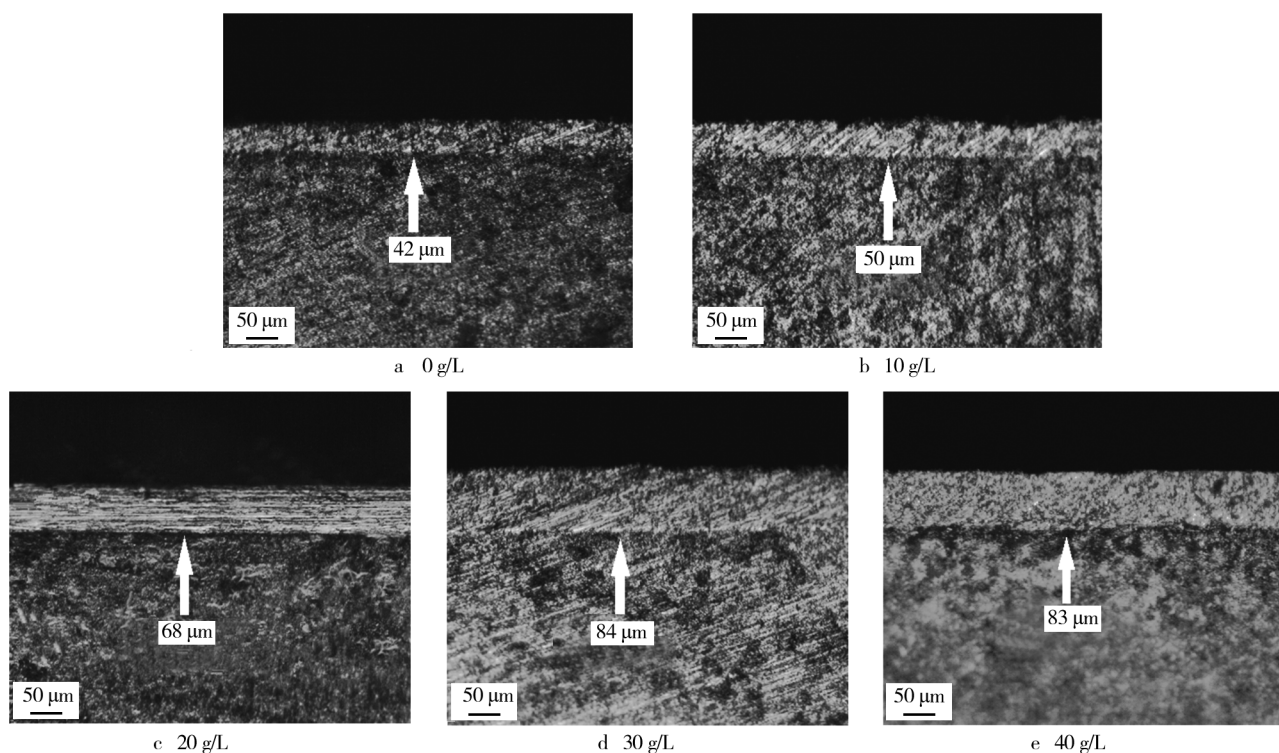


图4 不同氯化镍含量下镀层的截面形貌及厚度

Fig. 4 Cross-section morphology and thickness of the coating prepared with different contents of nickel chloride

镀液中离子浓度大大提高,黏度系数增大,颗粒团聚的趋势加大,悬浮于电镀液中的颗粒相对浓度显著降低,影响了颗粒在镀层中的含量及沉积速率,致使镀层厚度减小^[10-11]。

2.3 氯化镍含量对镀层显微硬度的影响

由维氏显微硬度测试原理可知,当镀层厚度为压痕深度的7倍以上时,才能获得准确的显微硬度值。采用正四棱锥体的维氏金刚石压头测量时,压痕的深度为菱形压痕对角线长度的1/7。经测试得知,实验中所测镀层的厚度远大于压痕深度的7倍,符合测试要求,所测显微硬度值为镀层的真实硬度值。

从图5可以看出,随着氯化镍含量的不断增加,镀层硬度呈现出先增大、后减小的变化趋势,与镀层厚度随氯化镍含量的变化趋势基本相同。这是由于随着镀液中氯化镍含量的增加,镀液的导电能力提高,微粒的分散能力提高,单位时间内通过搅拌作用输送到阴极表面的微粒数量增多,纳米TiN微粒潜入镀层中的几率也增大^[12-13]。在超声及搅拌的分散作用下,纳米TiN粒子均匀分布在镀层晶粒内部和晶界处,有效阻碍了镀层内部位错的移动和微裂纹的扩展,使微粒与金属之间的强化效应增加,具有弥散强

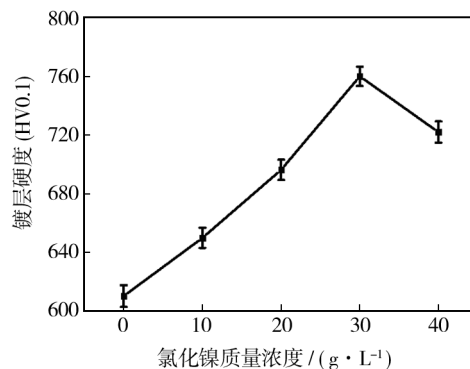


图5 镀层显微硬度随镀液氯化镍含量的变化

Fig. 5 Change of microhardness of coating with the content of nickel chloride

化的效果^[14-16];此外,TiN粒子的增多不仅能增大阴极极化,还能降低金属成核的过电位,有利于新晶核的形成,同时抑制晶粒长大,起到细化晶粒的效果^[17-19];因此随着氯化镍含量的增加,镀层中TiN粒子的含量增加,镀层的硬度逐渐提高。当氯化镍质量浓度超过30 g/L时,镀液中的粒子浓度过大,使得颗粒团聚趋势加大,悬浮在镀液中的颗粒相对浓度降低,TiN颗粒在镀层中的含量显著降低,致使镀层硬度减小。另一方面,氯化镍含量过高,造成阳极过度

溶解,产生阳极泥,生成的杂质会共沉淀夹杂在镀层中,使镀层缺陷增多,结晶错位的可能性增大,组织致密性变差,也使得镀层硬度降低^[20]。

2.4 氯化镍含量对镀层微观形貌的影响

不同氯化镍含量下所得镀层的表面 SEM 形貌见图 6。如图 6a 所示,镀液不加入氯化镍时,镀层表面呈现不规则团块状,峰谷交错,微粒分布杂乱,晶粒大小不一,且平均粒径较大。如图 6b 和 c 所示,随着氯化镍的加入,镀层表面变得平缓,组织趋于致密,平均粒径逐渐减小。如图 6d 所示,氯化镍质量浓度达到 30 g/L 时,晶粒平均粒径最小,大小趋于一致,分布均匀。如图 6e 所示,氯化镍质量浓度超过 30 g/L 时,晶粒平均尺寸有变大的趋势。分析认为,镀液中没有加

入氯化镍时,阳极因没有活化剂而钝化析氧,镀液 pH 值降低,阴极析氢量增加,阴极表面析氢导致镀层微粒异常增大^[21-22]。随着镀液中氯化镍含量的提高,阴极极化程度加强,新晶核形成的速率提高,新晶核数量的增加抑制了晶粒长大,因此镀层表面致密,晶粒得到细化。另一方面,随着氯化镍含量的增加,沉积速率加快,单位时间内到达阴极表面的纳米 TiN 颗粒增多,纳米 TiN 颗粒可以降低阴极过电位,并作为新的晶核生长点,同时还能抑制基质金属的长大,促使镀层晶粒细化,使复合镀层表面比较光滑^[12,23]。氯化镍质量浓度超过 30 g/L 之后,镀液的导电能力不再提高,晶核生成的速率下降,同时镀液微粒团聚严重,致使镀层中纳米 TiN 微粒的含量降低,对晶粒的细化作用减弱,因此晶粒尺寸开始增大。

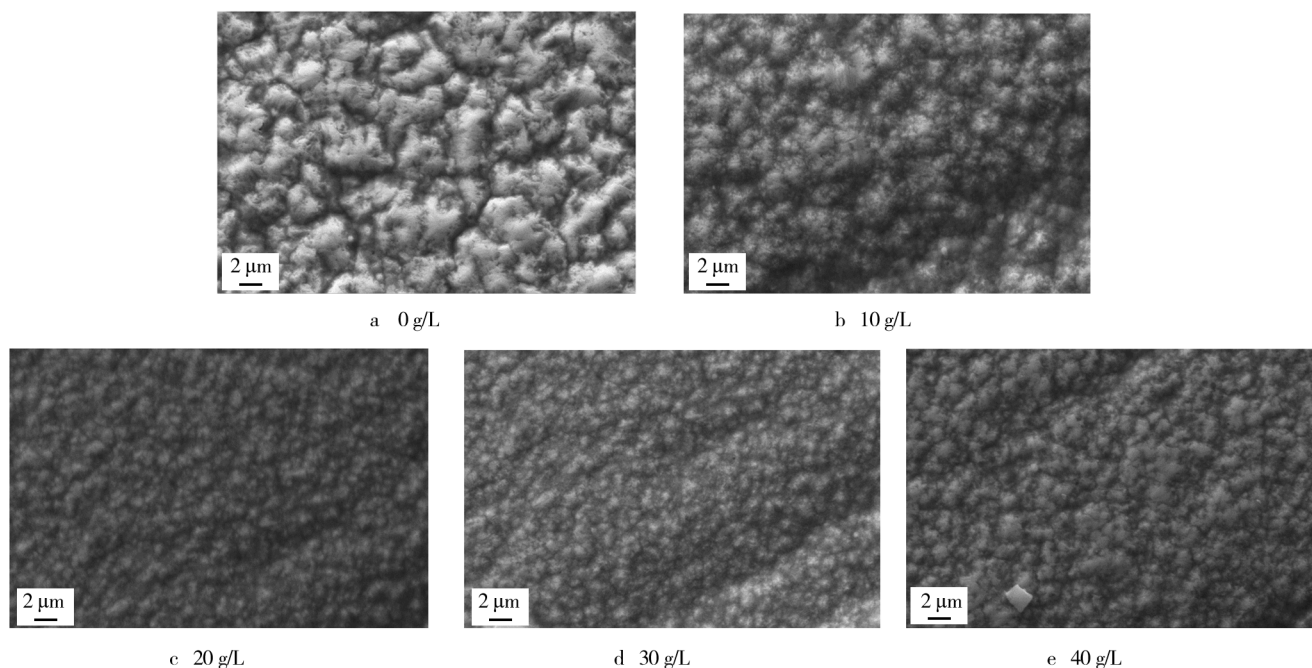


图6 不同氯化镍含量下镀层的表面 SEM 形貌

Fig. 6 The SEM surface morphology of coating prepared with different contents of nickel chloride

3 结论

1) 随着氯化镍含量的增加,镀液的电导率逐渐提高,电阻值逐渐降低,超过 30 g/L 后,电导率基本不变。

2) 镀层的厚度随镀液中氯化镍含量的增加而逐渐增加,达到 30 g/L 时,厚度最大,超过 30 g/L 之后,厚度基本不变。

3) 镀液中氯化镍质量浓度低于 30 g/L 时,镀层显微硬度随氯化镍含量的增加而逐渐提高;30 g/L

时,硬度达到最大值;高于 30 g/L 后,硬度开始降低。

4) 随镀液氯化镍含量的增加,镀层晶粒平均尺寸先减小,后增大。当氯化镍质量浓度为 30 g/L 时,镀层表面平整,晶粒平均尺寸最小,且分散均匀。

参考文献

- [1] 陈亚,李世嘉. 现代实用电镀技术[M]. 北京:国防工业出版社,2002.
CHEN Ya, LI Shi-jia. Modern Practical Electroplating Technology [M]. Beijing: National Defence Industry Press,

- 2002.
- [2] 刘任志. 实用电铸技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- LIU Ren-zhi. Practical Electroforming Technology[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
- [3] 欧阳小琴, 周琳燕, 余斌, 等. 镍基合金镀层的研究现状[J]. 电镀与精饰, 2014, 36(7): 20—24.
- OUYANG Xiao-qin, ZHOU Lin-yan, YU Bin, et al. Research Status of Electroplated Nickel-based Alloy Coating[J]. Plating and Finishing, 2014, 36(7): 20—24.
- [4] 于明明, 李洪友. 工艺参数对 Ni-TiN 纳米复合镀层形貌的影响[J]. 电镀与环保, 2013, 33(6): 6—8.
- YU Ming-ming, LI Hong-you. Effects of Process Parameters on Surface Morphology of Ni-TiN Nano Composite Coating[J]. Electroplating & Pollution Control, 2013, 33(6): 6—8.
- [5] 薛玉君, 司东宏, 刘红彬, 等. 电沉积方式对 Ni-CeO₂ 纳米复合镀层摩擦磨损性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(9): 2157—2162.
- XUE Yu-jun, SI Dong-hong, LIU Hong-bin, et al. Effects of Electrodeposition Methods on Friction and Wear Properties of Ni-CeO₂ Nanocomposite Coating[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(9): 2157—2162.
- [6] 吴蒙华, 雪金海, 吕昊. 热处理对纳米 Ni-TiN 复合镀层摩擦磨损性能的影响[J]. 功能材料, 2010, 41(4): 607—609.
- WU Meng-hua, XUE Jin-hai, LV Hao. Effects of Heat Treatment on Wear Resistance of Nano Ni-TiN Composite Layer[J]. Functional Materials, 2010, 41(4): 607—609.
- [7] TANG Jun, WANG Hong. An Investigation of Microstructure and Mechanical Properties of UV-LIGA Nickel Thin Films Electroplated in Different Electrolytes[J]. Journal of Micro-mechanics and Microengineering, 2010(20): 25—33.
- [8] 安茂忠. 电镀理论与技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2003.
- AN Mao-zhong. Plating Theory and Technology[M]. Harbin: Harbin Industrial University Press, 2003.
- [9] 覃奇贤, 刘淑兰. 电镀溶液的导电性[J]. 电镀与精饰, 2008, 30(2): 24—26.
- QIN Qi-xian, LIU Shu-lan. Electric Conductivity of Electroplating Bath[J]. Plating and Finishing, 2008, 30(2): 24—26.
- [10] 夏法锋, 吴蒙华, 贾振元, 等. 纳米 TiN 粒子在 Ni-TiN 复合镀层中的作用研究[J]. 金属热处理, 2007, 32(3): 62—64.
- XIA Fa-feng, WU Meng-hua, JIA Zhen-yuan, et al. Effect of Nano TiN Particles on Ni-TiN Composite Coatings[J]. Heat Treatment of Metals, 2007, 32(3): 62—64.
- [11] LAJEVARDIA S A, SHAHRABI T, SZPUNARB J A. Synthesis of Functionally Graded Nano Al₂O₃-Ni Composite Coating by Pulse Electrodeposition[J]. Applied Surface Science, 2013, 279: 180—188.
- [12] 雪金海, 吴蒙华, 夏法锋. 超声-电沉积 Ni-TiN 复合镀层组织和性能研究[J]. 表面技术, 2009, 38(4): 13—15.
- XUE Jin-hai, WU Meng-hua, XIA Fa-feng. Study on Microstructure and Properties of Ultrasonic-electrodeposited Ni-TiN Composite Layer[J]. Surface Technology, 2009, 38(4): 13—15.
- [13] GYFTOU P, PAVLATOU E A, SPYRELLIS N. Effect of Pulse Electrodeposition Parameters on the Properties of Ni/Nano-SiC Composites[J]. Applied Surface Science, 2008, 254: 5910—5916.
- [14] 楚广, 刘生长. 新型 Ni-Cu 复合镀层的制备[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2007, 38(3): 474—479.
- CHU Guang, LIU Sheng-zhang. Preparation of Ni-Cu Composite Coating by Composite Electroplating[J]. Journal of Cent South University (Science and Technology), 2007, 38(3): 474—479.
- [15] 侯峰岩, 王为, 刘家臣, 等. ZrO₂ 纳米颗粒在 Ni-ZrO₂ 复合镀层中的分散性对镀层结构及性能的影响[J]. 材料工程, 2004(3): 21—23.
- HOU Feng-yan, WANG Wei, LIU Jia-chen, et al. Effect of Dispersibility of ZrO₂ Nanoparticles in the Ni-ZrO₂ Composite Coatings on Microstructures and Properties of Composite Coatings[J]. Materials Engineering, 2004(3): 21—23.
- [16] 吴玉程, 邓宗钢. 镍磷合金碳化硅复合镀层的制备与磨损性能研究[J]. 稀有金属, 1998, 22(4): 15—19.
- WU Yu-cheng, DENG Zong-gang. Research on Composition and Wear Resistance of Nickel Phosphorus Alloy-Silicon Carbide Composite Coatings[J]. Chinese Journal of Rare-metals, 1998, 22(4): 15—19.
- [17] 张文峰, 朱荻, 薛玉君, 等. 镍-碳化硅纳米复合电铸层的制备[J]. 特种铸造及有色合金, 2004(5): 9—11.
- ZHANG Wen-feng, ZHU Di, XUE Yu-jun, et al. Preparation of Compound Electroplate Layer of Nano Ni-SiC Particulate[J]. Special Casting and Nonferrous Alloys, 2004(5): 9—11.
- [18] 宁智, 王元刚, 闫帅, 等. 激光重熔对 Fe-ZrO₂ 复合镀层形貌及性能的影响[J]. 表面技术, 2014, 43(4): 101—105.
- NING Zhi, WANG Yuan-gang, YAN Shuai, et al. Effects of Laser Remelting on Surface Morphology and Properties of Fe-ZrO₂ Composition Coating[J]. Surface Technology, 2014, 43(4): 101—105.
- [19] 王金东, 李颖, 夏法锋. 脉冲电流密度对 Ni-SiC 镀层微观结构和显微硬度的影响[J]. 功能材料, 2014, 45(18): 18096—18098.

- Journal of Alloys and Compounds, 2010, 495(1): 97—103.
- [6] AL-KANDARY S, ALI A A M, AHMAD Z. Morphology and Thermo-mechanical Properties of Compatibilized Polyimide-Silica Nanocomposites [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2005, 98(6): 2521—2531.
- [7] FRACH P, GLOESS D, BARTZSCH H, et al. Advanced Key Technology for Magnetron Sputtering and PECVD of Inorganic and Hybrid Transparent Coatings [J]. Thin Solid Films, 2010, 518(11): 3105—3108.
- [8] BARTZSCH H, FRACH P, GOEDICKE K. Anode Effects on Energetic Particle Bombardment of the Substrate in Pulsed Magnetron Sputtering [J]. Surface and Coatings Technology, 2000, 132(2): 244—250.
- [9] 程守洙, 江之永. 普通物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1982.
- CHENG Shou-zhu, JIANG Zhi-yong. General Physical[M]. Beijing: Higher Education Press, 1982.
- [10] 徐学基, 诸定昌. 气体放电物理[M]. 上海: 复旦大学出版社, 1996.
- XU Xue-ji, ZHU Ding-chang. Gas Discharge Physical[M]. Shanghai: Fudan University Press, 1996.
- [11] 冯光光, 刘崇林, 卢龙. 基体负偏压对膜层形貌与性能的影响[J]. 热加工工艺, 2013, 42(14): 103—105.
- FENG Guang-guang, LIU Chong-lin, LU Long. Effect of Substrate Negative Bias Voltage on Morphology and Properties of Film[J]. Hot Working Technology, 2013, 42(14): 103—105.
- [12] 张光耀, 高原, 张焱, 等. 磁控溅射功率对引线支架表面沉积 W 组织及性能的影响[J]. 表面技术, 2014, 43(6): 33—36.
- ZHANG Guang-yao, GAO Yuan, ZHANG Yan. Effect of Magnetron Sputtering Power on the Structure and Properties of Deposition W on the Surface of Lead Frames [J]. Surface Technology, 2014, 43(6): 33—36.
- [13] 李忠厚, 宫学波, 郭腾腾, 等. 基体偏压改变对镁合金 Ti/TiN 膜质量的影响[J]. 表面技术, 2015, 44(1): 88—91.
- LI Zhong-hou, GONG Xue-bo, GUO Teng-teng, et al. Effect of Change of Bias Voltage on the Quality of Ti/TiN Film on Magnesium Alloy [J]. Surface Technology, 2015, 44(1): 88—91.
- [14] THOMA M. Plating on Titanium[J]. Plating & Surface Finishing, 1983, 70(1): 96—98.
- [15] 夏益祥, 李荻. 钛合金镀后热处理对镀层结合力的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2001, 30(5): 388—390.
- XIA Yi-xiang, LI Di. Effect of Heat Treatment on Adhesion of Nickel-plated Coating on Surface of Titanium[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2001, 30(5): 388—390.
-
- (上接第 12 页)
- WANG Jin-dong, LI Ying, XIA Fa-feng. Effect of Current Density on Microstructure and Microhardness of Ni-SiC Coatings[J]. Functional Materials, 2014, 45(18): 18096—18098.
- [20] 邹森. 电镀工艺主要参数对氨基磺酸镍镀层的影响[J]. 电子工业专用设备, 2011, 40(8): 44—46.
- ZOU Sen. Effect of the Main Process Parameters on the Nickel Coating of the Nickel Sulfamate[J]. Electronic Industrial Specialized Equipment, 2011, 40(8): 44—46.
- [21] EBRAHIMI F, AHMED Z. The Effect of Current Density on Properties of Electrodeposited Nanocrystalline Nickel[J]. Journal of Applied Electrochemistry, 2003, 33: 733—739.
- [22] 熊俊良, 付明, 张红波. 氨基磺酸镍电铸层产生针孔、麻点的原因分析及工艺改进[J]. 电镀与涂饰, 2014, 33(17): 744—747.
- XIONG Jun-liang, FU Ming, ZHANG Hong-bo. Analysis of Formation Causes of Pinhole and Pit in Sulfamate Electroformed Nickel Coating and Process Improvement[J]. Electroplating & Finishing, 2014, 33(17): 744—747.
- [23] 薛玉君, 刘红彬, 兰明明, 等. 超声条件下脉冲电沉积 Ni-CeO₂ 纳米复合镀层的高温抗氧化性[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(8): 1599—1604.
- XUE Yu-jun, LIU Hong-bin, LAN Ming-ming, et al. High Temperature Oxidation Resistance of Ni-CeO₂ Nanocomposite Coatings by Pulse Electrodeposition under Ultrasound Condition[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(8): 1599—1604.