

# 氧化铝陶瓷表面化学镀镍工艺及镀层性能研究

郑晓辉，单冬冬，宋皓，叶雄，吴迪，谭俊

(装甲兵工程学院 装备维修与再制造工程系, 北京 100072)

**摘要:** 目的 在氧化铝陶瓷表面化学镀金属镍镀层, 研究施镀时间对  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷表面化学镀镍层的表面形貌、组织结构、显微硬度、表面粗糙度和镀镍层结合力的影响。方法 所用镀液组成及工艺参数为:  $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  25 g/L,  $\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  22 g/L,  $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  64 g/L,  $(\text{NH}_4)\text{SO}_4$  62 g/L,  $\text{pH}=5.0\sim 6.0$ , 水浴加热至 90 °C, 施镀时间 1~4 h。采用 NovaNanoSEM50 型场发射扫描电子显微镜观察镀层的表面微观形貌, 采用 TH765 型自动显微硬度仪测试镀层硬度, 采用 OLS4000 型三维形貌测量仪测量镀层表面粗糙度, 采用压入法和热震试验评价镀层的结合性能。结果 施镀时间为 1~4 h 时, 1 h 镀层表面金属光泽性好, 呈银白色, 4 h 镀层表面更为细腻, 但表面光泽性较差。随着施镀时间的增长,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷表面化学镀镍层表面越光滑, 显微硬度越大。不同施镀时间下的化学镀层均没有出现起泡、片状剥落或者与氧化铝基体分离等现象。结论 施镀时间为 1~4 h 时, 在温度和 pH 不变的情况下, 随着施镀时间增加, 化学镀镍层厚度变化不大, 但是镀层颗粒更细小, 显微硬度明显提高, 表面粗糙度降低, 镀层结合力良好。

**关键词:** 氧化铝; 化学镀镍; 微观结构; 显微硬度; 热震法

**中图分类号:** TQ153.3    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1001-3660(2017)10-0128-07

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.10.018

## Electroless Nickel Plating Process and Properties of Alumina Ceramics

ZHENG Xiao-hui, SHAN Dong-dong, SONG Hao, YE Xiong, WU Di, TAN Jun

(Department of Equipment Maintenance and Remanufacturing, Academy of Armored Force Engineering, Beijing 100072, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the effects of plating time on surface morphology, microstructure, microhardness, surface roughness and adhesion of electroless nickel plating on alumina. Plating bath composition and process parameters were as follows:  $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  25 g/L,  $\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  22 g/L,  $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  64 g/L,  $(\text{NH}_4)\text{SO}_4$  62 g/L,  $\text{pH}=5.0\sim 6.0$ , heating in water bath to 90 °C and plating time 1~4 h. Surface morphology of the coatings was observed by using NovaNanoSEM50 field emission scanning electron microscopy (SEM), hardness by TH765 automatic microhardness tester, surface roughness by OLS4000 3D measurement instrument and adhesion strength by thermal shock test and in indentation method. Provided with plating time of 1~4 h, the coatings exhibited good metallic glossiness and looked silvery white after 1 h, the coating was more delicate after 4 h, but the surface gloss was poor. As the deposition time prolonged, the smoother surface of nickel plating on  $\text{Al}_2\text{O}_3$  was, the higher its microhardness would be; the electroless coatings were free from blistering, flaking or with separation from alumina

收稿日期: 2017-05-14; 修訂日期: 2017-08-15

**Received:** 2017-05-14; **Revised:** 2017-08-15

**基金项目:** 武器装备预研基金项目 (9140C850202100C85)

**Fund:** Supported by the Equipment Pre-research Fund Project (9140C850202100C85)

**作者简介:** 郑晓辉 (1979—), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为材料成形及制备。

**Biography:** ZHENG Xiao-hui (1979—), Female, Doctor, Lecture, Research focus: material preparation and formation.

**通讯作者:** 谭俊 (1961—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为材料表面工程。

**Corresponding author:** TAN Jun (1961—), Male, Ph. D., Professor, Research focus: material surface engineering.

matrix. Provided with the plating time of 1~4 h, unchanged temperature and pH, as the plating time prolongs, the thickness of coatings changes slightly, the coating grains are finer, microhardness increases obviously and surface roughness reduces. Also, the coating exhibits good adhesion to substrate.

**KEY WORDS:** alumina; electroless nickel plating; microstructure; microhardness; thermal shock method

陶瓷具有高硬度、高耐蚀性、高介电性等诸多优点。随着材料科学和工艺的发展,陶瓷材料已从传统的硅酸盐材料,发展成为除了要求力学性能外,还要求声、光、热、电等方面性能的现代陶瓷材料<sup>[1-3]</sup>,其用途也越来越广。陶瓷应用时,往往要进行部分或全部的表面金属化处理,以使陶瓷更容易电镀加工、生产,增加其可焊性,增强其与金属间的结合力,并且使其表面具有金属光泽<sup>[4-7]</sup>。

陶瓷化学镀是实现陶瓷材料表面金属化的一种重要手段,镀后能进一步扩大其用途,使其在电子电路、装饰材料等方面得到应用。化学镀不需要外加电源,操作方便,工艺简单,镀层均匀,孔隙率低,外观良好,能在塑料、陶瓷等多种非金属基体上沉积,包覆性优良(不用外加电源,凡镀液能浸到的部位,即使是复杂零件的微小孔、盲孔都可以获得均匀镀层),附着力、抗腐蚀性、耐磨性好,功能性优异,以上优点使其得到了迅速发展和广泛应用<sup>[8-11]</sup>。

目前,陶瓷表面金属化主要应用于电子元件制造、电磁屏蔽和室内装饰等领域。国内已有不少关于陶瓷表面金属化的报道。崔永丽等<sup>[12]</sup>为提高陶瓷金属化层的焊接性能,提出了一种陶瓷二次金属化镀镍工艺,介绍了镀镍液的配方、工艺条件及具体工艺流程,探讨了镀镍层常见缺陷的原因并提出了解决方法。张德库<sup>[13]</sup>研究了硫酸镍浓度、次亚磷酸钠浓度、施镀温度、施镀时间等对镀层沉积速率的影响,对镀层进行了金相分析,从而得到了化学镀镍的优化工艺。但有关施镀时间对陶瓷表面化学镀镍层性能影响的报道较少。

本文采用化学镀的方法在  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷表面制备金属镍镀层。研究了不同施镀时间对  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷表面化学镀镍层的表面形貌、组织结构、显微硬度、表面粗糙度以及镀镍层结合力的影响。

## 1 实验

### 1.1 实验材料

选取  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷片作为基材试样,试样原始形貌见图 1,尺寸为 25.0 mm×25.0 mm×2.0 mm。采用 XRD 衍射仪对试样进行相分析,样品为纯度 99% 的  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  陶瓷,衍射图谱见图 2。



图 1 未经任何处理的原始试样  
Fig.1 Original sample

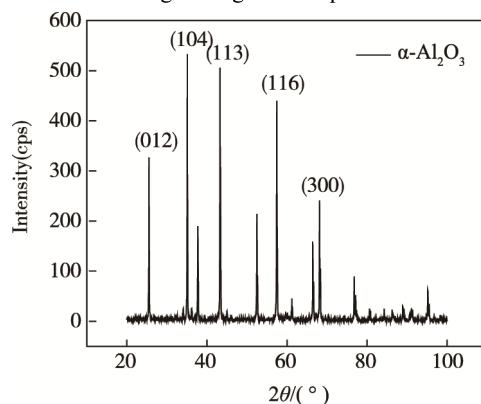


图 2 试样的 XRD 图谱  
Fig.2 XRD pattern of samples

### 1.2 化学镀液制备

化学镀液主要包括镍盐、还原剂和络合剂三种成分,陶瓷表面化学镀镍配方及工艺条件见表 1。

表 1  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷表面化学镀镍配方及工艺条件  
Tab.1 Formula and process parameters of electroless nickel plating on  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ceramic

Content	Concentration /( $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ )	Condition	Parameter
$\text{NiSO}_4\cdot6\text{H}_2\text{O}$	25	Temperature/°C	90 (Water bath)
$\text{NaH}_2\text{PO}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$	22	Time/h	1~4
$\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7\cdot2\text{H}_2\text{O}$	64	pH	5.0~6.0
$(\text{NH}_4)\text{SO}_4$	62		

注:配制溶液时应先将主盐 ( $\text{NiSO}_4\cdot6\text{H}_2\text{O}$ ) 和络合剂 ( $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7\cdot2\text{H}_2\text{O}$ ) 溶解,再加入还原剂,若次序颠倒将会发生沉淀,导致镀液失效。

### 1.3 陶瓷表面化学镀镍工艺流程

化学镀之前，要对氧化铝陶瓷表面进行预处理。工艺流程为：除油→超声波清洗→脱水烘干→粗化→超声波清洗→脱水烘干→敏化→活化→水洗→化学镀镍。上述水洗工序均采用去离子水，超声波清洗均采用无水乙醇，目的是彻底清除含在陶瓷微孔中的除油液。脱水烘干是为了将陶瓷含浸的水彻底脱掉，一般在200~400℃下进行烘干。采用氢氟酸进行化学粗化，使用氟化物处理液是为了溶解陶瓷中的二氧化硅，从而使表面具有一定的粗糙度。陶瓷的敏化与活化，分别采用氯化亚锡溶液、氯化钯溶液作为敏化液和活化液。完成以上表面预处理后，陶瓷进入镀槽开始化学镀镍<sup>[14-17]</sup>。

### 1.4 测试与表征

采用美国FEI公司生产的NovaNanoSEM50型场发射高分辨扫描电子显微镜(FE-SEM)观察镀层的表面微观形貌，采用日本奥林巴斯公司生产的OLS4000型三维形貌测量仪测试镀层表面粗糙度。采

用TH765型自动显微硬度仪测试镀层硬度，载荷100g，保持10s，每种镀层测4个位置，计算平均值。

采用WGL-230B型电热鼓风干燥箱进行热震实验，测试镀层的结合性能，温度设定为(250±10)℃，保温30min，然后迅速将试样放入室温的水中骤冷，反复进行25次。采用北京时代四合科技有限公司生产的THR-150D型洛氏硬度计，进行压入法镀层结合力测试：120°圆锥金刚石压头，施加压力60kg，保持30s，出现明显压痕。采用NovaNanoSEM50型场发射扫描电子显微镜(FE-SEM)观察压痕微观形貌及裂痕。采用兰州微纳仪器科技有限公司生产的MFT-4000型多功能材料表面性能试验仪，测量不同镀层破坏的临界载荷，加载速度60N/m，划痕长度10mm。

## 2 结果与讨论

### 2.1 化学镀镍层的表面形貌

图3为不同施镀时间下氧化铝陶瓷表面化学镀镍的SEM图。从图3a可知，施镀1h时，镀层表面

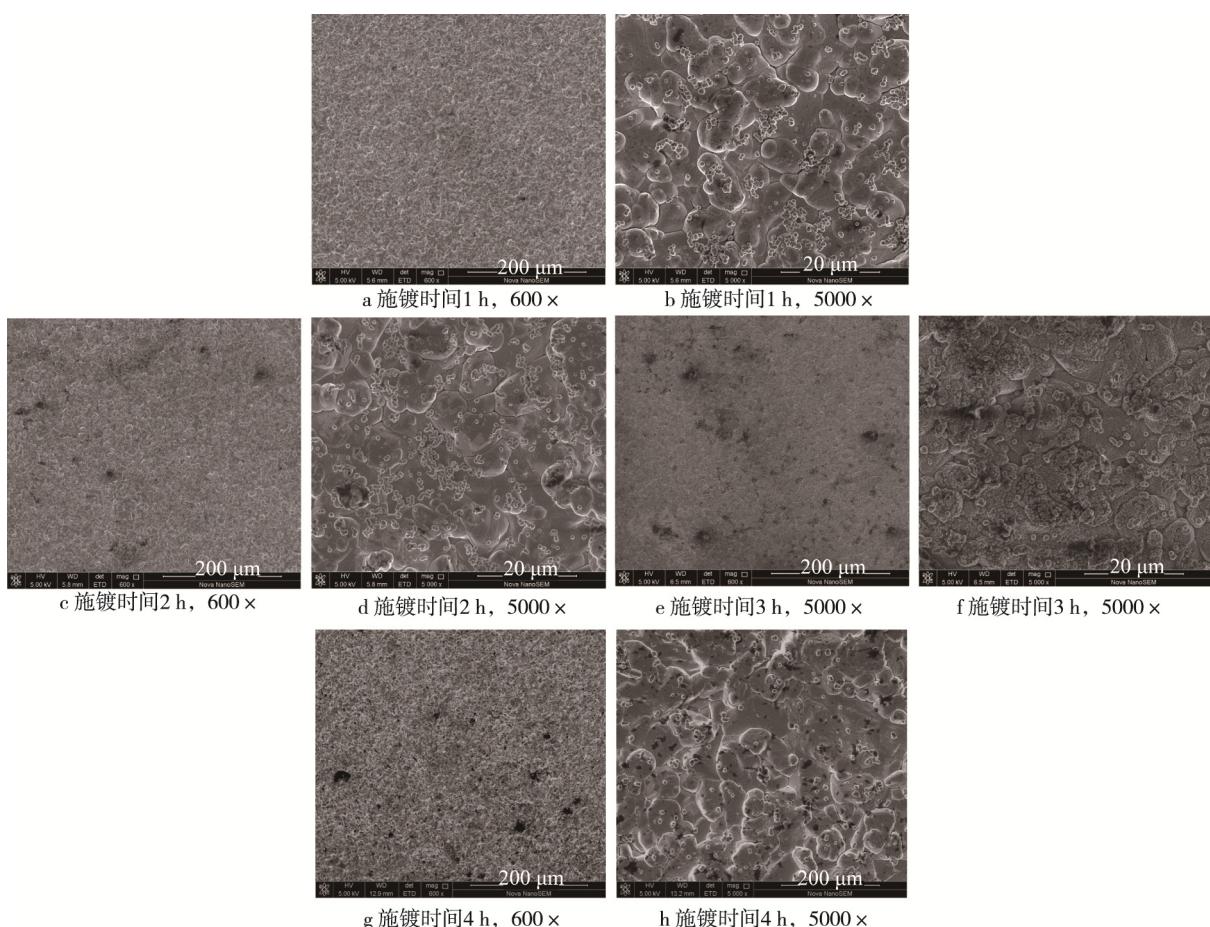


图3 氧化铝陶瓷表面化学镀镍层的微观形貌

Fig. 3 Morphology of electroless nickel plating on alumina ceramic: a) 1 h plating time, 600×, b) 1 h plating time, 5000×, c) 2 h plating time, 600×, d) 2 h plating time, 5000×, e) 3 h plating time, 600×, f) 3 h plating time, 5000×, g) 4 h plating time, 600×, h) 4 h plating time, 5000×

较平整, 镀层结合致密, 覆层颗粒较为粗大, 镀层表面无孔洞。随着施镀时间的延长, 镀层表面平整度无明显变化, 但在高倍电镜下可观察到覆层颗粒变得多而细小, 呈葡萄状排布, 致密无间隙。对比不同施镀时间下氧化铝陶瓷表面化学镀镍的组织形貌, 发现施镀 1 h 镀层的表面金属光泽性好, 呈银白色, 施镀 4 h 镀层的表面更为细腻, 但表面光泽性较差。

## 2.2 化学镀镍层的表面粗糙度

图 4 为施镀时间对  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷表面化学镀镍层表面粗糙度的影响。由图可知, 随着施镀时间的增长,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷表面化学镀镍层表面粗糙度越小。施镀 2 h 时, 表面粗糙度开始有明显改善; 施镀 3 h 时, 表面粗糙度变化不大; 施镀 4 h 时, 表面最光滑,  $R_a$  为 0.668  $\mu\text{m}$ , 且较其他施镀时间, 表面粗糙度改善幅度最为明显。这是因为随着施镀时间的增长, 镀层颗粒逐渐变细小, 晶粒排布更致密, 从而使得  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷表面化学镀镍层的表面粗糙度变小, 表面变光滑。

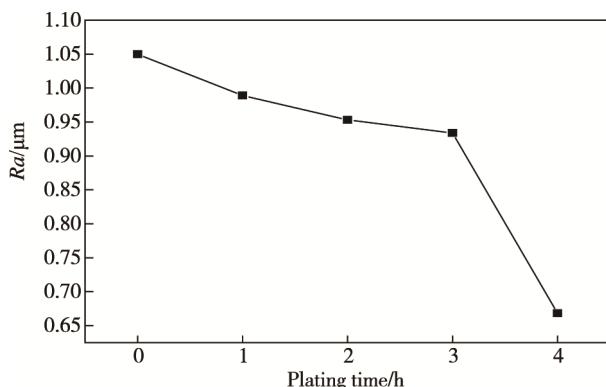


图 4 施镀时间与表面粗糙度的关系

Fig.4 Relationship between plating time and surface roughness

## 2.3 化学镀镍层的显微硬度

图 5 为氧化铝陶瓷表面化学镀镍层显微硬度与施镀时间的关系。由图可知, 随着施镀时间增长, 氧化

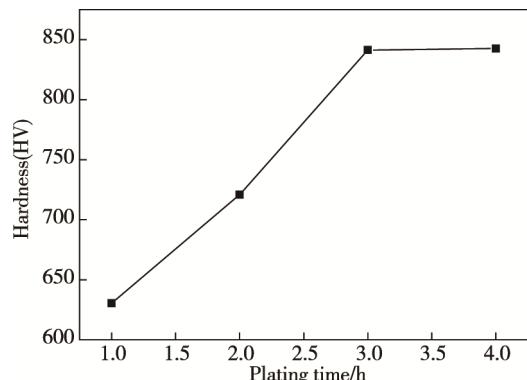


图 5 不同施镀时间下所得氧化铝陶瓷表面化学镀镍层显微硬度

Fig.5 Microhardness of electroless nickel plating on alumina prepared at different plating time

铝陶瓷表面化学镀镍层的显微硬度逐渐增大。施镀 4 h 时, 硬度最大。这与施镀时间对镀层微观组织的影响有密切关系, 沉积层的显微硬度主要受晶粒尺寸、内应力以及可动位错密度的影响, 氧化铝陶瓷表面化学镀镍层亦如此, 其显微硬度  $H$  与晶粒尺寸  $d$  之间的关系可用 Hall-Petch 公式  $H=H_0+k/d^{0.5}$  描述。其中,  $H_0$  和  $k$  是大于零的常数。显然,  $H$  与  $1/d^{0.5}$  呈线性关系, 即镀层的显微硬度随晶粒尺寸的减小而提高<sup>[17]</sup>。

## 2.4 化学镀镍层的结合力

采用压入法和热震试验评价镀层的结合力。图 6 为热震实验后, 不同施镀时间下氧化铝陶瓷表面化学镀镍层的表面形貌。可以看出, 经热震实验后, 不同施镀时间下所制备的化学镀层均没有出现起泡、片状剥落或者与氧化铝基体分离等现象, 即镀层结合力良好, 无明显宏观变化。

图 7 为采用压入法后所形成压痕及周围裂纹的微观形貌, 裂纹在图中用箭头标出, 并用数字进行了编号, 便于记录裂纹数量。图 7b、d、f、h 分别为图 7a、c、e、g 中白色方框区域的放大照片。由图

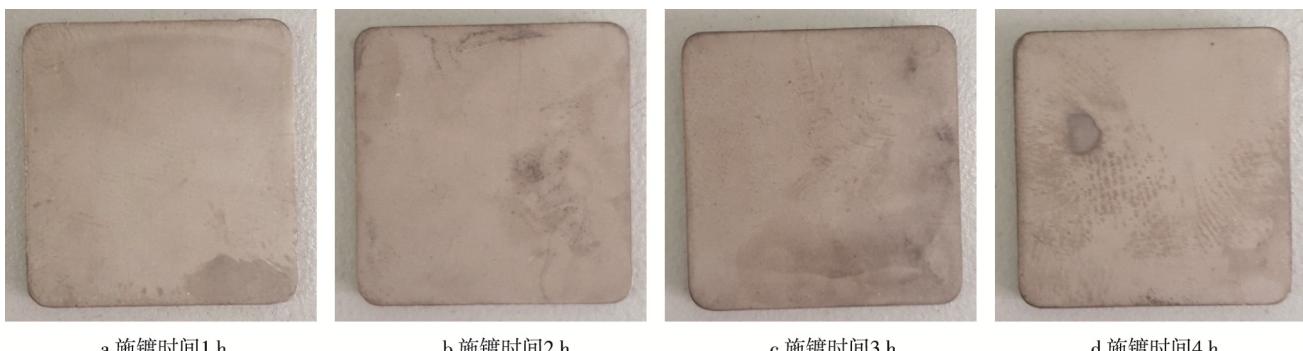


图 6 氧化铝陶瓷表面化学镀镍层热震实验后表面形貌

Fig.6 Morphology of electroless nickel plating on alumina ceramic after thermal shock test: a) 1 h plating time, b) 2 h plating time, c) 3 h plating time, d) 4 h plating time

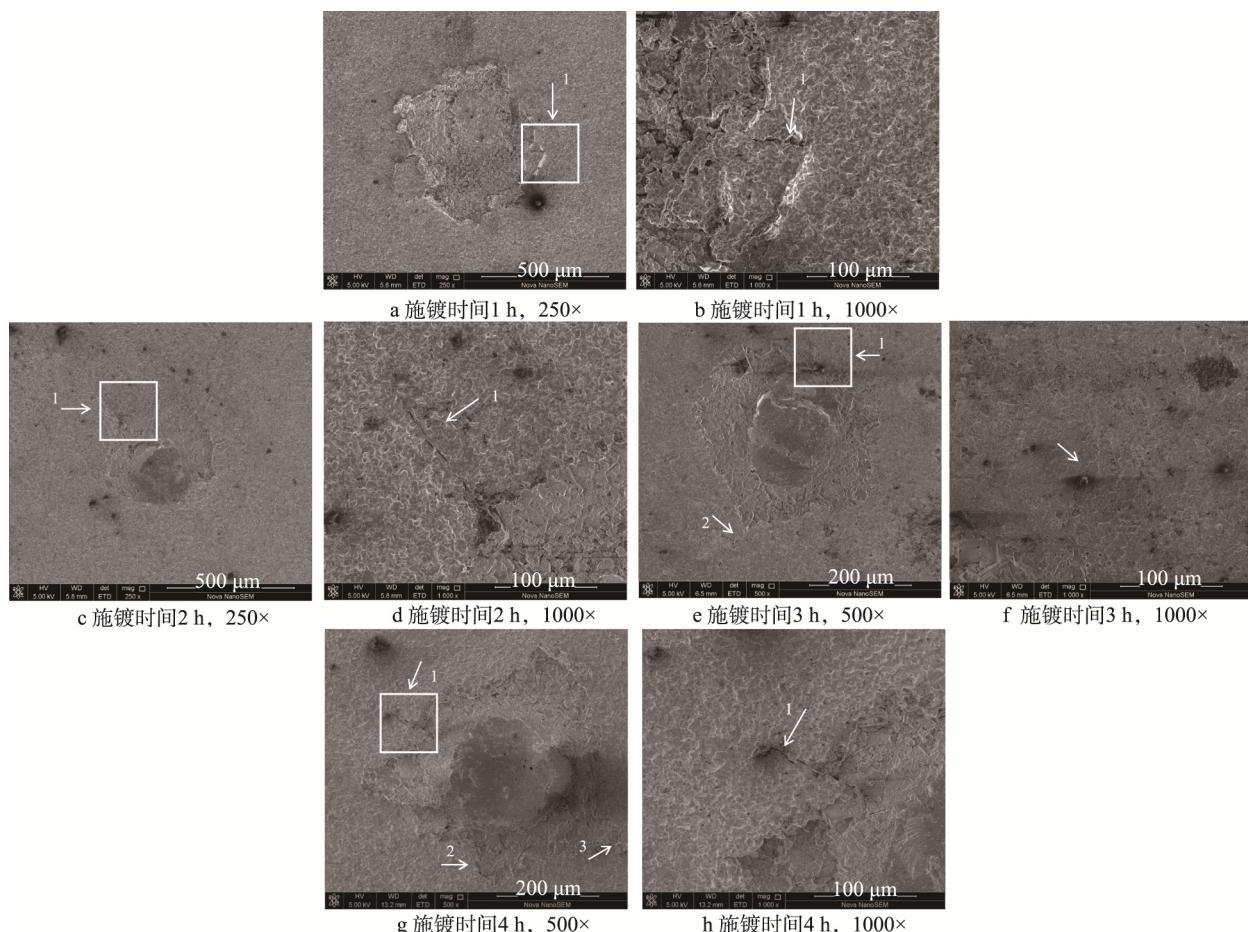


图 7 氧化铝陶瓷表面化学镀镍层压痕及裂纹的微观形貌

Fig.7 SEM micrographs of indentation and cracks on electroless nickel plating sample surfaces on alumina ceramic: a) 1 h plating time, 250×, b) 1 h plating time, 1000×, c) 2 h plating time, 250×, d) 2 h plating time, 1000×, e) 3 h plating time, 500×, f) 3 h plating time, 1000×, g) 4 h plating time, 500×, h) 4 h plating time, 1000×

可以看出,施镀1 h时,压痕周围有明显片状剥落,裂纹较少且较为粗大;施镀2 h时,压痕较为平整,无明显剥落痕迹,裂纹较少且较为粗大;施镀3、4 h时,裂纹明显增多且细长,有向外延伸的趋势。施镀时间为1 h和2 h时,裂纹较少,说明镀层结合力更好。

上述两种方法可定性检测镀镍层与基体的结合强度,对于不同施镀时间对结合强度的影响并不能用数值来反应出结果,为此采用划痕法来测量不同施镀时间下,氧化铝陶瓷表面镀镍层结合力大小。

图8为氧化铝陶瓷化学镀镍层表面划痕的宏观形貌,

图9为氧化铝陶瓷化学镀镍层的划痕实验曲线和划痕的微观形貌。从图9a中可以看到,载荷约11.5 N处出现了显著声发射信号,而且摩擦力和摩擦系数也在此处发生了明显变化,此时对应的划痕距离约1.3 mm。观察该处的形貌(图9b)可以看到镀层已发生破坏,暴露出了陶瓷基体,说明该处信号对应镀层与基体结合失效。一般用临界载荷的大小来表征镀层的结合强度,划痕法测得的不同施镀时间样品的临界载荷见图10。由图可以看出,随着施镀时间的增

长,临界载荷越来越小,且施镀3 h和施镀4 h时的差别不大,与压入法测得的结果一致。这是因为随着施镀时间的增长,氧化铝陶瓷表面镀镍层的硬度增大,镀镍层脆性增大。



图8 氧化铝陶瓷化学镀镍层表面划痕的宏观形貌

Fig.8 Macromorphology of surface scratch on electroless nickel plating on alumina ceramic

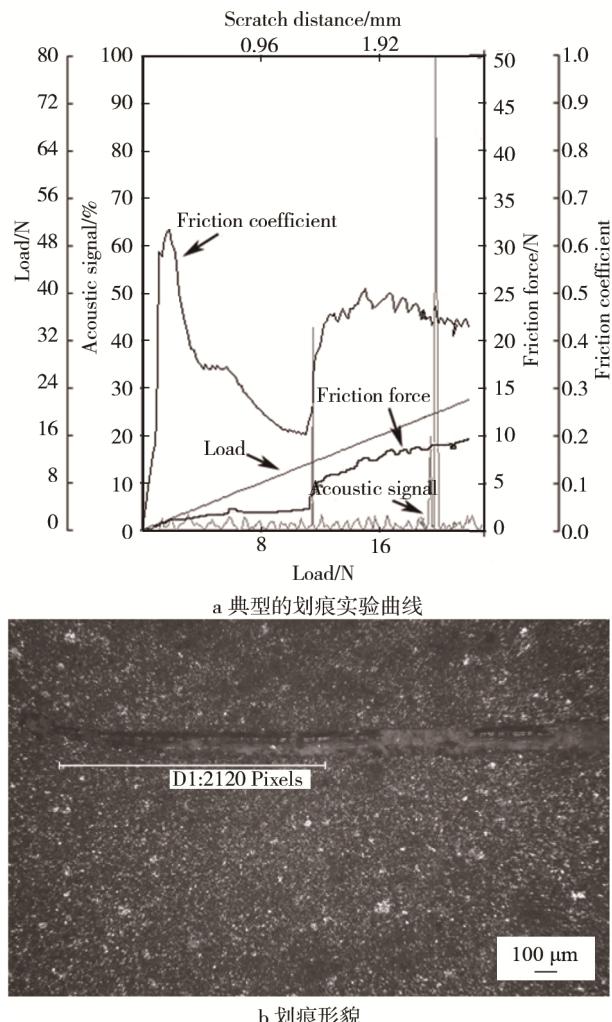


图9 氧化铝陶瓷表面化学镀镍层划痕形貌与划痕实验曲线  
Fig.9 Scratch experiment curve of electroless nickel plating on alumina ceramic: a) typical scratch experimental curve, b) scratch morphology

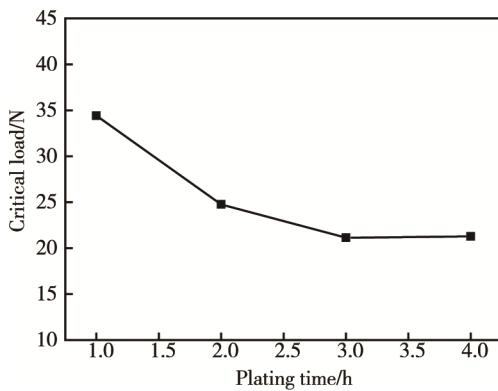


图10 氧化铝陶瓷表面化学镀镍层临界载荷与施镀时间的关系  
Fig.10 Relationship between critical load plating and plating time of electroless nickel

### 3 结论

采用化学镀制备氧化铝陶瓷表面镀镍层，镀层组

织致密，表面平整，无孔洞。施镀时间为1~4 h时，随着施镀时间增长，表面越来越光滑，但金属光泽性逐渐降低。施镀时间对氧化铝陶瓷表面镀镍层的显微硬度有影响，施镀时间越长，镀层维氏硬度越大，但施镀3 h后，镀层硬度变化不明显，随施镀时间延长，镀层结合强度下降。施镀时间为2 h时，氧化铝陶瓷表面化学镀镍层的结合强度、表面粗糙度和光泽度较优，工艺参数为： $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  25g/L,  $\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  22g/L,  $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  64g/L,  $(\text{NH}_4)\text{SO}_4$  62g/L, pH=5.0~6.0，水浴加热至90 °C。

### 参考文献：

- [1] 任呈强, 谢发勤. 电子陶瓷化学镀及应用[J]. 电子工艺技术, 2003, 24(1): 32-35.  
REN Cheng-qiang, XIE Fa-qin. Electronic Ceramic Electroless Plating and Application[J]. Electronics Process Technology, 2003, 24(1): 32-35.
- [2] 刘西德, 崔培英. 陶器材料表面化学镀镍[J]. 化学世界, 2006, 47(1): 54-56.  
LIU Xi-de, CUI Pei-ying. Electroless Nickel Plating on the Surface of Pottery[J]. Chemical World, 2006, 47(1): 54-56.
- [3] 谷新, 王周成, 林昌健. 陶瓷表面化学镀的前处理工艺新进展[J]. 材料保护, 2003, 36(9): 1-4.  
GU Xin, WANG Zhou-cheng, LIN Chang-jian. New Developing of Pretreatment Process for Electroless Plating of Ceramics[J]. Materials Protection, 2003, 36(9): 1-4.
- [4] 沈伟, 沈晓丹, 张钦京. 化学镀镍行业近年的发展状况[J]. 材料保护, 2007, 40(2): 50-54.  
SHEN Wei, SHEN Xiao-dan, ZHANG Qin-jing. Current State and Development Trend in Industry of Electroless Nickel Plating[J]. Materials Protection, 2007, 40(2): 50-54.
- [5] 李丽波, 李东平, 张书华, 等. 陶瓷表面化学镀Ni-P合金工艺的研究[J]. 电镀与环保, 2011, 31(3): 19-21.  
LI Li-bo, LI Dong-ping, ZHANG Shu-hua, et al. Research on Electroless Ni-P Alloy Plating on Ceramics Surface[J]. Electroplating & Pollution Control, 2011, 31(3): 19-21.
- [6] 郭英奎, 李然, 王东.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷化学镀 Ni-P 工艺研究[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2004, 19(3): 20-23.  
GUO Ying-kui, LI Ran, WANG Dong. Study of Ni-P Chemical Plating Process on  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Ceramic[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2004, 19(3): 20-23.
- [7] 赵鹏, 王维德. 化学镀镍技术及其研究进展[J]. 材料与表面处理技术, 2007(7): 100-102.  
ZHAO Peng, WANG Wei-de. Progress of Electroless Nickle Plating Technology[J]. New Technology & New Process, 2007(7): 100-102.

- [8] PALANIAPPA M, BABU G V, BALASUBRAMANIAN K. Electroless Nickel-Phosphorus Plating on Graphite Powder[J]. Materials Science and Engineering: A, 2007, 471(1): 165-168.
- [9] 李宁. 化学镀实用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2012: 56-118.  
LI Ning. Practical Technology of Electroless Plating[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2012: 56-118.
- [10] DOMENECH S C, JR E L, DRAGO V, et al. Electroless Plating of Nickel Phosphorous on Surface Modified Poly(Ethylene Terephthalate) Films[J]. Applied Surface Science, 2003, 220(1): 238-250.
- [11] 翟阳, 任家烈, 庄丽君. 大气中低温液相过渡连接  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷与 WX60 钢的研究[J]. 航空材料学报, 1994, 14(4): 36-40.  
ZHAI Yang, REN Jia-lie, ZHUANG Li-jun. TLP-Bonding of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  to WX60 Steel at Lower Temperature in Air with RS Alloy Foils as Insert Metal[J]. Journal of Aeronautical Materials, 1994, 14(4): 36-40.
- [12] 崔永丽, 江利, 周华茂. 陶瓷二次金属化镀镍工艺 [J]. 电镀与涂饰, 2002, 21(4): 23-25.  
CUI Yong-li, JIANG Li, ZHOU Hua-mao. Secondary Metallization of Ceramic Surface by Nickel Plating[J]. Electroplating & Finishing, 2002, 21(4): 23-25.
- [13] 张德库, 王克鸿, 应飘飘.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  陶瓷表面化学镀镍工艺及其低温连接[J]. 焊接学报, 2007, 28(1): 69-73.  
ZHANG De-ku, WANG Ke-hong, YING Piao-piao. Electroless Nickel Plating on  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Ceramics and Its Bonding in Low Temperature[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(1): 69-73.
- [14] ZOU Gui-sheng, WU Ai-ping, ZHANG De-ku, et al. Joint Strength with Soldering of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Ceramics after Ni-P Chemical Plating[J]. Tsinghua Science and Technology, 2004(5): 607-611.
- [15] BENOUNIS M, JAFFREZIC-RENAULT N. Elaboration of an Optical Fibre Corrosion Sensor for Aircraft Applications[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2004, 100(1-2): 1-8.
- [16] 柏冬. 陶瓷化学镀镍的研究[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2004, 32(6): 102-103.  
BAI Dong. Study of Electroless Nickel on the Surface Ceramics[J]. Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition), 2004, 32(6): 102-103.
- [17] 朱棉霞, 吴先益, 王竹梅. 压电陶瓷表面化学镀镍技术及发展趋势[J]. 中国陶瓷, 2008, 44(9): 11-13.  
ZHU Mian-xia, WU Xian-yi, WANG Zhu-mei. The Technology and Developing Trend of Electroless Plating Ni on the Surface of the Piezoelectric Ceramic[J]. Chinese Ceramics, 2008, 44(9): 11-13.