

铝合金盘基片表面微腐蚀形成机理研究

肖将楚 冉红锋 张新虎 朱 毅 王少华 秦献超
(深圳长城开发精密技术有限公司)

摘 要 针对铝合金盘基片化学镀镍、抛光后表面存在局部集中分布并两面对称、尺寸为 1~3 μm 的微小凹陷,利用扫描电镜 (SEM)、聚焦离子束显微镜 (FIB)、轮廓仪对缺陷试样的微观组织、结构进行分析研究,并结合铝基片生产及化学镀镍工艺流程,对铝基片在不同工序过程中表面形貌的演变及其机理进行分析。发现在铝合金盘基片清洗过程中,由于清洗剂中的缓蚀剂浓度分布不均,而低浓度缓蚀剂对铝基片具有较强腐蚀性,造成铝基片表面部分析出相周围铝基体发生腐蚀,形成点蚀坑。经化学镀镍后,点蚀坑位置的镍层表面形成凹陷,在抛光过程中无法完全去除,最终在产品表面形成凹点型缺陷。通过增加自动溢流搅拌装置,消除清洗剂浓度分布不均匀的情况,有效避免铝基片表面发生异常的不均匀腐蚀。

关键词 铝合金;金属间化合物;点蚀;缓蚀剂

中图分类号 TG178;TG146.21 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.02.018

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Formation Mechanism of Micro-corrosion on the Surface of Aluminum Disk Substrate

Xiao Jiangchu, Ran Hongfeng, Zhang Xinhui, Zhu Yi, Wang Shaohua, Qin Xianchao
(Shenzhen Changcheng Kaifa Precision Technology Co., Ltd.)

Abstract: Considering the surface of aluminum alloy disk substrate is locally concentrated and symmetrical after chemical mechanical polishing (CMP) with tiny concave defects in range of 1~3 μm, scanning electron microscope (SEM), focused ion beam microscope (FIB) and surface profile were utilized to analyze the microstructure and cross section of specimens. Combined with the production process of aluminum substrate and electroless nickel-plating process, the evolution of surface morphology in various processes as well as the mechanism was investigated. The results indicate that serious corrosion occurs around the intermetallic compound (IMC) area on the surface of the aluminum substrate during the cleaning process, due to the uneven concentration distribution of the detergent, whereas low-concentration inhibitor is highly corrosive, resulting in a large number of pits. After electroless nickel plating, concaves are generated on the pit location of the nickel layer, which can not be completely removed during the polishing process, and finally leads to pitting defects on the surface of the product. By adding the automatic overflow stirring device, the heterogeneous distribution of cleaning agent concentration is eliminated, effectively avoiding the abnormal uneven corrosion.

Key Words: Aluminum Alloy, Intermetallic Compound, Pitting, Corrosion Inhibitor

随着大数据、云计算以及 5G 技术的发展,产生的海量数据需要廉价、可靠的存储介质。而硬盘存储器以其高可靠性、低成本、大容量的特点,成为数据中心、企业服务器的首选存储方案。为适应市场对机械硬盘体积和存储能力的更高要求,在传统垂直磁记录 (PMR) 技术的基础上,通过增加磁头数量和碟片数量来推高硬盘容量。因此,硬盘碟片也正朝着面积更大,厚度更薄的趋势发展。此外,为了提高硬盘的磁存储密度,采用磁盘充氦技术,也进一步降低磁头飞高^[1,2]。而新一代

能量辅助磁记录热辅助磁记录技术 (HAMR) 的应用,比目前传统的垂直磁记录 (PMR) 记录密度可提高约 5 倍。由于盘基片表面缺陷将影响磁盘表面热流分布^[3],不仅影响到磁头的正常工作,而且缺陷区域无法进行数据存储,也极大地降低了磁盘的存储密度。因此,对于磁盘表面的缺陷尺寸、数量控制越来越严,小至亚微米级缺陷都要严格控制^[4]。

由于铝合金的比强度较高,加工成本较低,工艺较为成熟,目前占据 7 成以上的大尺寸 (3.5 寸) 机械硬盘

收稿日期:2021-06-16;修改稿收到日期:2021-07-07
第一作者简介:肖将楚,男,1990 年出生,工程师,广东深圳 (518035),E-mail:jiangchuxiao@kaifa.cn
通信作者:冉红锋,男,1970 年出生,高级工程师,广东深圳 (518035),E-mail:hongfengran@kaifa.cn
引用格式:肖将楚,冉红锋,张新虎,等. 铝合金盘基片表面微腐蚀形成机理研究[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(2):221-226.
XIAO J C, RAN H F, ZHANG X H, et al. Formation mechanism of micro-corrosion on the surface of aluminum disk substrate[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(2):221-226.

基片市场。随着对硬盘基片表面缺陷尺寸要求越来越高,铝合金加工过程中的腐蚀及其防护问题逐渐凸显。目前铝合金盘基片的加工流程主要有铝基片毛坯制备、铝基片双面研磨加工、铝基片化学镀镍及抛光等 3 个步骤^[5],其中研磨工艺分为粗磨、退火、精磨、清洗等工序,最终得到表面光洁、平整、厚度均匀的铝基片产品。清洗后的铝基片表面将直接作为化学镀镍的基底,而清洗过程中铝基片直接暴露于各种清洗溶液中,通过添加缓蚀剂防止合金发生腐蚀^[6,7],但是由于铝合金的化学性质活泼,对清洗过程中合金表面腐蚀情况的控制将直接影响后续化学镀镍后盘基片的表面品质。因此,研究清洗过程中合金表面微观组织形貌及相结构的演变对于清洗工艺优化及减少化学镀镍、抛光过程中的缺陷产生具有积极意义。

本课题对缺陷盘基片的表面形貌、缺陷分布,以及在清洗中微观组织、相结构的演变等观察分析,研究了铝合金盘基片表面不均匀腐蚀的影响因素及微孔缺陷的产生机理,旨在为铝合金盘基片的生产提供参考。

1 试验材料及方法

目前使用的铝合金盘基片是在 5086 铝合金的基础上开发而成,其主要成分见表 1。

表 1 铝合金盘基片的化学成分

Tab.1 Chemical composition of aluminum alloy disk substrate %						
w _B						
Si	Fe	Cu	Mg	Cr	Zn	Al
0.015	0.02	0.01	4.00	0.05	0.34	余量

利用 FEI Nanolab 600i 聚焦离子束场发射扫描电镜双束系统(SEM/FIB)将镀镍后表面缺陷部位进行离子束切割观察,分析缺陷处的镍层及其下方铝合金界面组织形貌特征。利用体积分数为 50%硝酸水溶液对缺陷部位进行腐蚀,分析缺陷部位镍层组织性能特征。将精磨后的盘基片浸泡于不同浓度、不同均匀性的清洗剂溶液中,利用 SEM/FIB 观察铝合金表面形貌的演变以及表面腐蚀的分布。对浸泡后的盘基片进行化学镀镍前处理,前处理采用二次浸锌法^[8],并利用 SEM/FIB 观察前处理对铝合金表面形貌的影响,分析清洗及前处理工艺与镍层表面缺陷产生的关联性。

2 试验结果与分析

2.1 缺陷组织形貌分析

图 1 为铝基片经过化学镀镍、抛光后镍层表面凹陷的微观形貌。从图 1a 中可以看出,凹陷(图中深灰色/灰色点)位于基片一侧,呈双面对称分布。从图 1b 可以看出,该缺陷是由于化学镀镍后,镍层表面形成的凹陷

深度较大,抛光工序无法完全去除造成的。最终在镍层表面形成尺寸为 1~3 μm,深度为 500 nm 的凹点型缺陷。

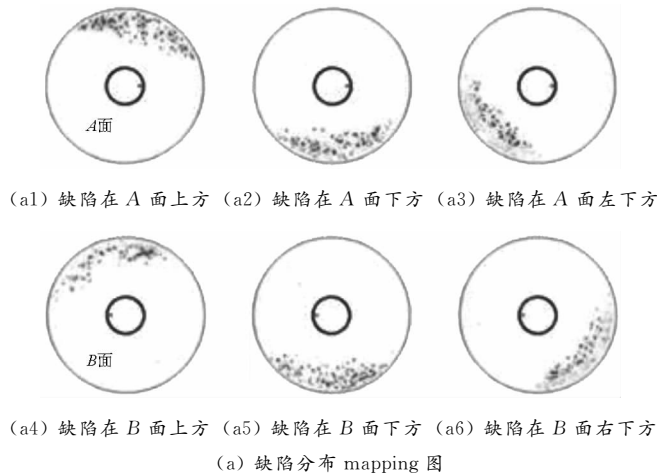


图 1 凹坑缺陷的分布及微观组织形貌(SEM)
Fig.1 The concave defects distribution and microstructure characteristics

图 2 为镍层表面凹陷 FIB 切片形貌。对未抛光的镍层表面的大尺寸凹陷进行 FIB 切割观察截面形貌,可以看到镍层表面凹陷下方的铝合金基体存在长约 8 μm,深约 2.5 μm 的凹坑,并且在凹坑周围存在一个圆形斜坡,斜坡宽度约为 3 μm。经过 50%硝酸溶液腐蚀 10 min 后,镍层出现均匀细小的层叠纹路,这归因于镀层 P 含量的周期性变化^[9]导致不同层间的耐蚀性存在微小差异,但在缺陷位置并未观察到腐蚀通道及点蚀,说明该区域镍层组织较为致密,化学镀镍工艺未出现异常。

用 50%硝酸溶液将缺陷试样表面镍层完全去除,用轮廓仪对缺陷进行线扫描,结果见图 3。可以看出,与铝合金表面金属间化合物(IMC)脱落留下的正常孔洞相比,异常腐蚀坑周围存在一个宽度约为 3 μm 的斜坡,导致腐蚀坑的整体尺寸明显大于正常 IMC 脱落造成的孔洞。由于化学镀镍过程中,Ni、P 原子在铝合金基体表面均匀沉积,一般情况下,基体表面的凹坑在镀镍后逐渐变得平缓,但出于对镀层耐腐蚀等性能考虑^[10],镍层厚度较小,当铝合金基体表面凹坑尺寸过大时,通过化学镀镍将无法完全抚平基体形貌的影响,最

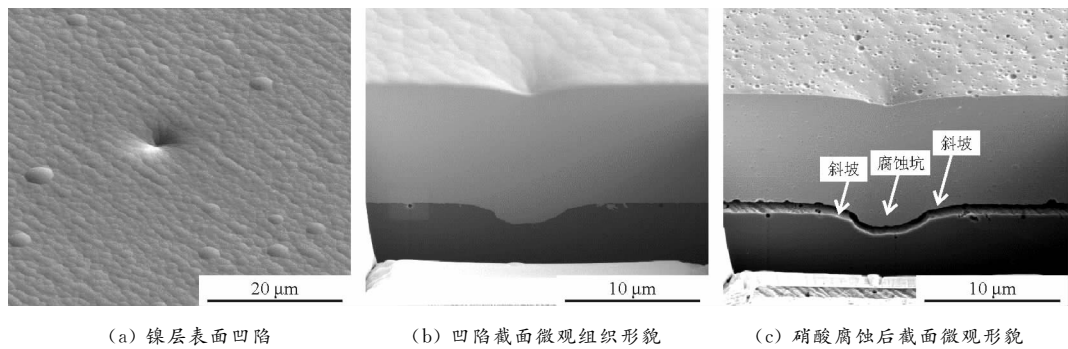


图 2 镍层表面凹陷 FIB 切片形貌

Fig.2 The FIB cross section feature of the concave on the surface

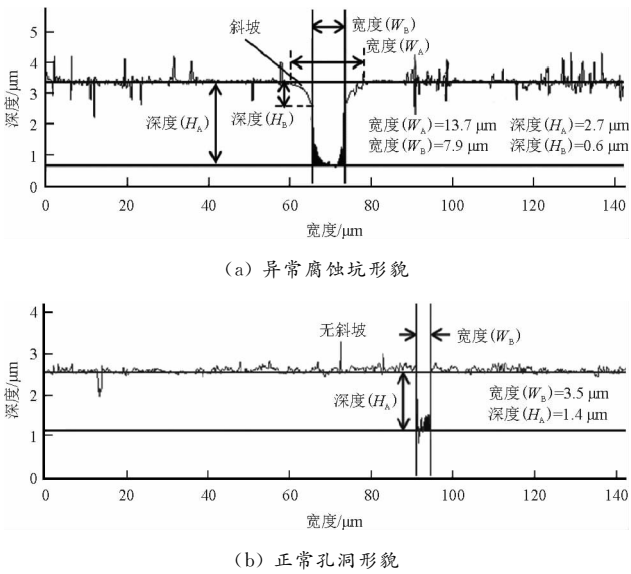


图 3 铝合金表面腐蚀坑线扫描结果

Fig.3 The linear scanning results of corrosion pits on the surface of aluminum alloys

终导致镍层表面产生大于抛光去除量的凹陷。

铝合金基片表面缺陷区域与正常区域 SEM 形貌见图 4。可以看出，缺陷区域铝合金表面 IMC 大多已经脱落，而正常区域合金表面仍残留有较多的 IMC。取 10 个随机区域进行凹坑数量及尺寸的统计，见图 5。可以看到缺陷区域的大尺寸凹坑数量明显高于正常区域。综上，在铝基片加工过程中，表面发生异常不均匀

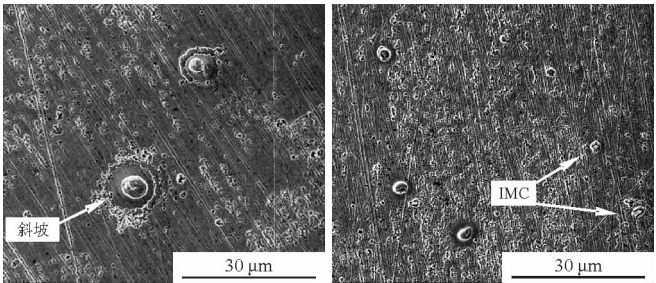


图 4 缺陷试样不同区域表面微观形貌

Fig.4 The micro morphology on different region of defect specimens

腐蚀，导致部分区域产生大尺寸凹坑，而在化学镀镍后，铝基体腐蚀坑上方镍层存在凹陷，在抛光过程中，凹陷无法被完全去除，最终导致缺陷产生。

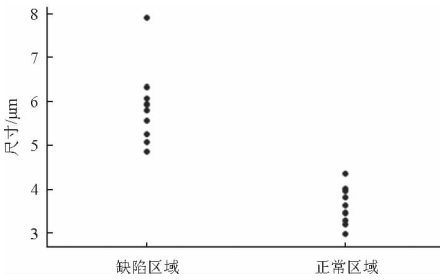


图 5 缺陷区域与正常区域凹坑数量及尺寸统计
Fig.5 The account of pits and dimension on the defect region and normal region

2.2 铝基片表面不均匀点蚀过程研究

铝合金盘基片经精磨后，需要经过清洗、烘干等工序，在清洗过程中，合金长时间与水接触，具有较大的腐蚀风险，因此，需要在清洗剂中添加一定量的缓蚀剂，防止合金表面发生腐蚀。

图 6 为去离子水与清洗剂浸泡 2 h 后铝基片表面形貌变化。可以看出，将铝基片置于去离子水中 2 h，表面 IMC 周围出现严重腐蚀，大部分 IMC 脱落，形成腐蚀坑，腐蚀坑平均尺寸为 5 μm ，而加入 3% 的清洗剂后，浸泡 2 h，在 IMC 周围仅出现 500 nm 宽的缝隙，腐蚀较为轻微。说明清洗剂中的缓蚀剂对铝合金具有明显的保护作用。5 系铝合金中主要的金属间化合物为 Al_3Fe 或 Al_4Fe 及 Mg_2Si ^[11,12]，其中 Mg_2Si 的电负性高于铝合金基体且大部分尺寸极小 ($<1\mu\text{m}$)，在电化学反应中作为阳极，很难造成铝基体表面大尺寸点蚀^[12]；而 Al-Fe 金属间化合物电负性低，且尺寸较大，部分 Al-Fe 金属间化合物尺寸达到 4~5 μm ，在溶液中 Al-Fe 金属间化合物作为阴极与铝基体构成原电池^[13]，加速铝基体腐蚀。

根据应用场景不同，缓蚀剂可分为有机缓蚀剂、无机缓蚀剂、钝化膜型缓蚀剂、沉淀膜型缓蚀剂、吸附膜型

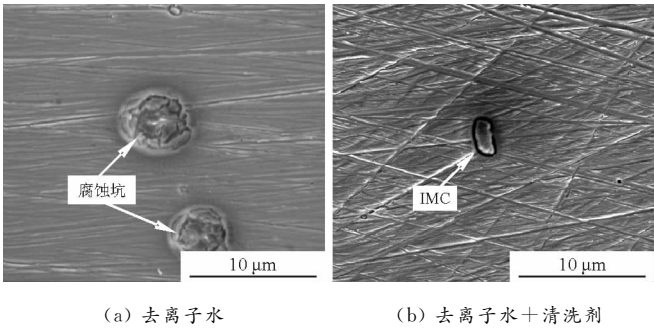
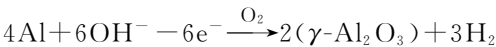


图 6 去离子水与清洗剂浸泡 2 h 后铝基片表面形貌变化
Fig.6 The surface morphologie evolution of aluminum alloy substrate after soaking in DI water and detergent

缓蚀剂^[14]。铝合金盘基片经精磨后,由于研磨液的作用,铝合金表面呈疏水特征。实践表明,疏水表面对镍层的孔隙率有很大影响,因此需要在清洗工序中,将铝合金表面转变成亲水特性,因此,选用正磷酸盐作为清洗剂中的阳极缓蚀剂以满足盘基片清洗要求。正磷酸盐缓蚀剂本身几乎没有氧化性,必须与溶液中的溶解氧共同作用,才能起到缓蚀作用。磷酸盐在水中水解后,产生 OH⁻,与金属离子作用,在金属表面形成一层致密的金属氧化物,从而起到钝化作用。这样阳极反应被抑制,有效阻止金属表面的进一步腐蚀。反应方程式如下^[15,16]:



此外,研究表明,磷酸根离子还有促进钝化膜形成

的作用,磷酸盐分子结构中氧-磷三键基团容易提供电子给具有空轨道的金属,并紧密吸附在金属表面,促进钝化膜形成^[17]。但是,作为阳极缓蚀剂,其缓蚀作用对溶液中正磷酸盐浓度有较高要求,表 2 为不同浓度清洗剂的 pH 值变化。

表 2 不同浓度清洗剂 pH 值变化
Tab.2 pH value variation with different detergent concentration

concentration	
浓度/%	pH 值
0.5	8.59
1	8.58
3	8.56
6	8.55
10	8.52
100	8.13

可以看到,清洗剂原液的 pH 值较低,用去离子水稀释后,促进了正磷酸盐水解,pH 值不断上升。采用不同浓度的清洗剂溶液对精磨后的铝合金盘基片进行浸泡试验(见图 7),可以看到,铝合金在 0.5% 清洗剂中浸泡 40 min 后,表面出现严重腐蚀,表面 IMC 全部脱落,形成大尺寸腐蚀坑,部分腐蚀坑尺寸超过 7 μm;而在 1% 清洗剂中浸泡 40 min,铝合金表面 IMC 脱落后留下的腐蚀坑尺寸明显小于 0.5% 浓度的;当浓度提高到 3% 时,铝合金表面 IMC 较为完整,未发生明显腐蚀。此外,在 10% 与 3% 清洗剂中浸泡 40 min 后,铝合金表面形貌无明显差异。

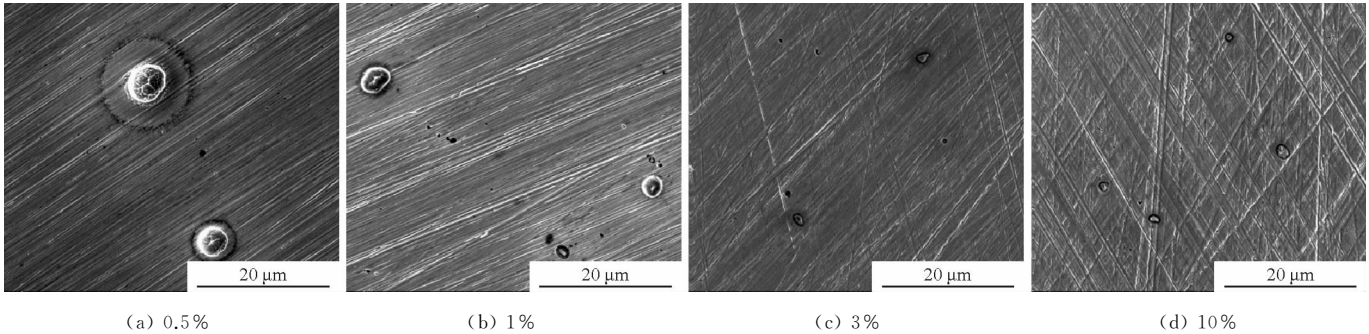


图 7 不同浓度清洗剂浸泡 40 min 后的铝合金表面形貌
Fig.7 The surface morphology after soaking in detergent with different concentration for 40 min

阳极型缓蚀剂要求有较高的浓度,当浓度较低时,阳极缓蚀剂无法在铝合金表面形成致密的保护膜,因此无法有效钝化铝合金表面,反而会造成铝合金的局部腐蚀。从试验数据来看,在去离子水中浸泡 2 h 后,铝合金表面腐蚀坑平均尺寸在 5 μm 左右,而在 0.5% 浓度清洗剂中浸泡 40 min,腐蚀坑尺寸就可以达到 7 μm,说明低浓度下正磷酸盐缓蚀剂可以明显加速铝合金的表面腐蚀。

此外,试验发现,清洗剂原液密度大于去离子水密度,当在去离子水中加入清洗剂时,清洗剂会迅速沉入

底部,无法充分与去离子水混合,在不搅拌的情况下,清洗槽内溶液呈梯度分布,槽底部浓度较高,顶部浓度较低。当浓度低于缓蚀剂起作用的最低浓度时,铝基片顶部区域的溶液不但没有缓蚀作用,反而加速铝合金腐蚀。此时,铝基片位于清洗槽底部的区域表面良好,未发生明显腐蚀,而位于清洗槽顶部的区域,IMC 周围发生严重腐蚀,出现大尺寸腐蚀坑,见图 8。

综上,在铝基片清洗过程中,在配置清洗剂时搅拌不充分,导致清洗槽上下区域缓蚀剂浓度分布不均,清洗槽上部区域缓蚀剂浓度较低,造成铝基片上部发生局

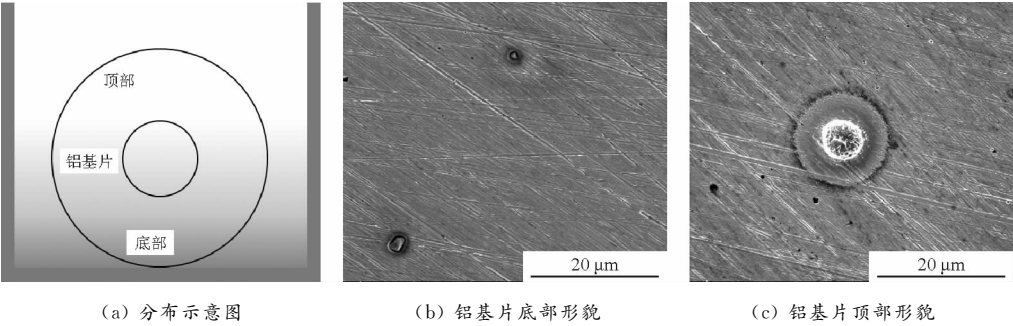


图 8 未搅拌时清洗剂浓度分布示意图及浸泡后铝基片不均匀腐蚀

Fig.8 Schematic diagram of detergent concentration distribution without stirring and heterogeneous corrosion on the surface after soaking

部严重点蚀。在之后的化学镀镍过程中,点蚀坑上方覆盖的镍层同样存在较深的凹陷,而其后的抛光工序由于正常的去除量较小,无法将深凹陷完全去除,从而导致最后产品缺陷检测时出现位于铝基片一侧,且两面对称分布的微孔缺陷。

2.3 铝合金盘基片表面微孔缺陷改善措施

由于清洗剂浓度不均匀,造成低浓度区域的铝合金发生严重的点蚀,在铝合金盘基片表面部分区域形成尺寸为7~10 μm的腐蚀坑。因此,在清洗槽内加装溢流搅拌装置,添加清洗剂后,通过溢流搅拌装置,使得整个清洗槽内溶液循环2次后,再放入铝基片进行清洗。通过采用自动溢流搅拌方式,可避免人为操作遗忘的情况,也同样避免机械搅拌过程中产生大量泡沫从而影响铝基片清洗操作。通过增加搅拌工序,清洗后的铝基片表面未发现明显腐蚀,见图9。

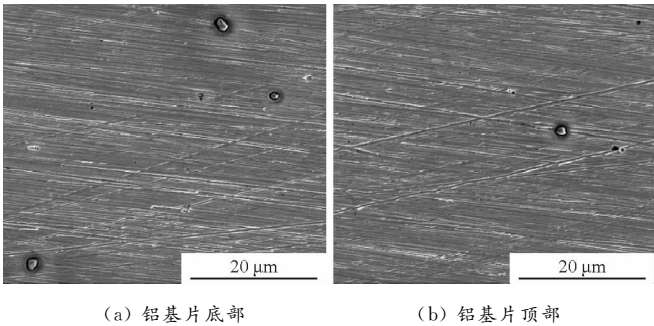


图 9 增加搅拌装置后铝合金表面不同区域微观形貌

Fig.9 The micro morphology on different regions of alloy after adding stirring process

此外,通过合金制备工艺的改进,减少铝合金盘基片表面金属间化合物数量和尺寸,从而减少发生原电池腐蚀的几率,降低缺陷率。

3 结 论

(1)铝合金盘基片表面化学镀镍后,在镍层表面形成尺寸为1~3 μm,深度为500 nm的凹点型缺陷。并

且在缺陷镍层下方的铝基体表面存在长约6 μm,深约1.5 μm的凹坑。与正常IMC脱落不同的是,在该凹坑周围存在一个尺寸约为4 μm的圆形斜坡。凹坑和斜坡的存在,造成化学镀镍后,在镍层表面形成凹陷,并在后续抛光过程中无法将凹陷完全去除,最终造成该缺陷。

(2)铝合金基体表面凹坑主要由于在清洗过程中,溶液中清洗剂不均匀分布,造成溶液上层清洗剂浓度较低,而清洗剂中的磷酸盐缓蚀剂为阳极缓蚀剂,在浓度不足时,无法在铝合金表面形成完整的钝化膜,反而加剧了铝合金的腐蚀,最终在铝合金盘基片上部表面形成大尺寸腐蚀坑。

(3)通过采用溢流搅拌工艺,使得清洗剂搅拌均匀,从而避免清洗剂浓度分布不均匀现象的发生,进而有效避免铝基片表面发生异常的不均匀腐蚀。

参 考 文 献

[1] 贺锋涛,冯晓强,郝爱花,等. 计算机硬盘磁头飞行高度实时检测及控制研究[J]. 西安文理学院学报(自然科学版), 2007(4): 53-56.

[2] 杨廷毅,白雪,吕传毅,等. 充气硬盘磁头滑块飞行特性影响因素研究[J]. 流体力学, 2017, 5(3): 91-101.

[3] 曾秦阳. HAMR 磁头磁盘界面传热及润滑剂材料转移特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.

[4] SONG W, OVCHARENKO A, KNIGGE B, et al. Effect of contact conditions during thermo-mechanical contact between a thermal flying height control slider and a disk asperity[J]. Tribology International, 2012, 55: 100-107.

[5] 王永峰,陈磊. 论缓蚀剂的作用机理及应用发展[J]. 科技经济导刊, 2020, 28(14): 134-135.

[6] 陈勇,宋玉苏,邓淑珍. 中性水中铸铁和铸铝的缓蚀行为研究[J]. 海军工程大学学报, 2002, 14(5): 80-82.

[7] 迟玉山,沈菊云,陈学贤. 计算机硬盘基板材料的研究[J]. 陶瓷学报, 2000(2): 115-120.

[8] 舒刚. 铝合金化学镀镍前处理新工艺研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2016.

[9] 姜晓霞. 化学镀理论及实践[D]. 沈阳: 中国科学院金属研究所, 2000.

TC6 钛合金高温低应变速率变形行为研究

朱 琳¹ 徐 勇¹ 陈乐平¹ 胡生双² 周 全¹
(1.南昌航空大学航空制造工程学院; 2.中航西安飞机工业集团股份有限公司)

摘 要 通过 Thermecmascor-Z100kN 热模拟试验机对 TC6 钛合金在变形温度为 900~945 ℃、应变速率为 0.000 1~0.1 s⁻¹、变形量为 70 % 条件下的高温变形行为进行研究。结果表明,变形温度越高,合金中初生 α 相向 β 相转变的越充分,而应变速率对初生 α 相的含量影响不大;应变速率为 0.000 1 s⁻¹、不同变形温度条件下,由于变形时间过长,材料充分发生动态再结晶,致使晶粒不断长大粗化;TC6 钛合金在应变速率为 0.000 1~0.01 s⁻¹ 发生连续动态再结晶,而当应变速率为 0.1 s⁻¹ 时则发生不连续动态再结晶。因此,适合 TC6 钛合金的热变形工艺参数范围:变形温度为 915~945 ℃,应变速率为 0.001~0.1 s⁻¹。

关键词 TC6 钛合金;高温变形;低应变速率;动态再结晶;微观组织

中图分类号 TG146.23 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.02.019

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Deformation Behavior of TC6 Titanium Alloy at High Temperature and Low Strain Rate

Zhu Lin¹, Xu Yong¹, Chen Leping¹, Hu Shengshuang², Zhou Quan¹
(1.School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University;
2.Avic Xi'an Aircraft Industry Group Co., Ltd.)

Abstract: The high temperature deformation behavior and microstructure evolution of TC6 titanium alloy were investigated by Thermocmascor-Z100kN thermal simulation testing machine under the conditions of deformation temperature of 900~945 ℃, strain rate of 0.000 1~0.1 s⁻¹, and deformation amount of 70 %. The results indicate that with increasing in the deformation temperature, the transformation from primary α phase to β phase is more completed, and the strain rate has little effect on the content of primary α-phase. At low strain rate of 0.000 1 s⁻¹ and different deformation temperature conditions, the material fully undergoes dynamic recovery due to the over-long deformation, which causes to grow and coarsen of the grain. The TC6 titanium alloy undergoes continuous dynamic recrystallization at a lower strain rate of 0.000 1~0.01 s⁻¹, while discontinuous dynamic recrystallization occurs at the strain rate of 0.1 s⁻¹. In conclusion, the thermal deformation process parameters suitable for TC6 titanium alloy are presented as follows: deformation temperature of 915~945 ℃ and strain rate of 0.001~0.1 s⁻¹.

Key Words: TC6 Titanium Alloy, High Temperature Deformation, Low Strain Rate, Dynamic Recrystallization, Microstructure

收稿日期:2021-07-01;**修改稿收到日期:**2021-07-26
基金项目:航空科学基金资助项目(2019ZE056009);江西省重点研发计划资助项目(20202BBEL53012)
第一作者简介:朱琳,男,1997 年出生,硕士研究生,南昌(330063),E-mail:2802859847@qq.com
通信作者:徐勇,男,1978 年出生,副教授,南昌(330063),E-mail:xuyong@nchu.edu.cn
引用格式:朱琳,徐勇,陈乐平,等. TC6 钛合金高温低应变速率变形行为研究[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(2):226-229.
ZHU L, XU Y, CHEN L P, et al. Deformation behavior of TC6 titanium alloy at high temperature and low strain rate[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(2):226-229.

[10] 刘冰洋,周根树,任颖,等. 镀层厚度对铝基化学镀镍磷导电性和耐蚀性的影响[J]. 表面技术, 2020, 49(6): 287-294.

[11] 冉红锋,肖将楚,朱毅. 铝合金盘基片化学镀镍缺陷的形成机理[J]. 中国表面工程, 2018, 31(3): 97-107.

[12] 李劲风,郑子樵,任文达. 第二相在铝合金局部腐蚀中的作用机制[J]. 材料导报, 2005(2): 81-83, 90.

[13] MUTOMBO K. Intermetallic particles-induced pitting corrosion in 6061-T651 aluminium alloy[A]. Materials Science Forum[C]. 2011.

[14] 宋蔚,田禾,张津红. 缓蚀剂的成膜机理分析[J]. 天津理工学院学报, 2004(4): 67-70.

[15] 王红美,尹艳丽,杜军,等. 磷酸盐浓度对 5083 铝合金微弧氧化膜组织与耐腐蚀性能的影响[J]. 中国表面工程, 2016, 29(5): 109-115.

[16] 张天胜,张浩,高红. 缓蚀剂[M]. 北京:化学工业出版社, 2008.

[17] 王成,江峰,林海潮,等. 无机成膜型缓蚀剂对铝合金缓蚀作用的研究[J]. 腐蚀与防护, 2000(12): 539-541.

(编辑:栗万仲)