

NdFeB 磁体表面二次化学镀 Ni-P 合金防腐性能研究*

冒爱琴^{1),2)} **

1)(安徽工业大学材料科学与工程学院,安徽马鞍山 243002)

2)(安徽省金属材料与加工重点实验室,安徽马鞍山 243002)

摘 要: 采用化学镀方法,在烧结 NdFeB 磁体表面镀覆 Ni-P 合金,以提高磁体的耐腐蚀性。通过沉积速率、单位表面积孔隙数量的测试试验,确定了 Ni^{2+} 与 H_2PO_2^- 的摩尔浓度比、络合剂浓度、稳定剂浓度、pH 值、施镀温度、时间等碱性预镀各组分的最佳浓度和工艺条件。测定了不同类型 Ni-P 化学镀试样和基体的单位表面积孔隙数量,以及在 10% (体积分数) HCl、3.5% (质量分数) NaCl 溶液和 20% (质量分数) NaOH 溶液中的腐蚀速率。结果表明:化学镀 Ni-P 合金能显著改善 NdFeB 永磁体的耐腐蚀性;以弱碱性化学镀为底层,酸性化学镀为表层的二次化学镀工艺可使磁体表面镀层的致密性和耐腐蚀性能最佳。

关键词: 烧结 NdFeB; 二次化学镀; Ni-P 镀层; 耐腐蚀性; 单位表面积孔隙数量

Study of the corrosion resistance property for NdFeB magnets with twice electroless plating Ni-P alloy

Mao Aiqin^{1),2)}

1)(School of Materials Science and Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan Anhui 243002, China)

2)(Anhui Key Laboratory of Metal Materials and Processing, Maanshan Anhui 243002, China)

Abstract: Electroless plating of Ni-P coating was carried out on sintered NdFeB magnets to improve their corrosion resistance. The best technological conditions such as metallic-ion ratio Ni^{2+} and H_2PO_2^- , complexing agent concentration, stabilizing agent concentration, pH value, temperature and time were optimized by testing the rate of deposition and the number of pore per area. The number of pore per area of different type of Ni-P deposits and substrate were measured and the corrosion rate were also studied in the NaCl solutions of 3.5wt%, the HCl solutions of 10vol% and the NaOH solutions of 20wt%. The result shows that all the type of deposits enhance the corrosion resistance of substrate. Also the twice electroless plating Ni-P alloy provides the best protection, with bottom film alkaline Ni-P plated and top of film acid Ni-P plated.

Key words: sintered NdFeB magnets; twice electroless plating; Ni-P coating; corrosion resistance; the number of pore per area

第三代稀土永磁合金 NdFeB 凭借优异的磁特性、良好的机械加工性能和相对低廉的价格,被广泛应用于电机、仪器仪表、磁共振成像等领域。但 Nd-FeB 永磁材料在潮湿的环境中,由于富 Nd 相的存在,使得磁体容易产生晶间腐蚀,从而导致磁性减弱

甚至粉化而失去功用^[1-3]。因此,如何提高 NdFeB 永磁材料的化学稳定性及耐蚀性已成为国内外研究的焦点。

一般采用表面防护处理技术^[4-9]如电镀、化学镀、复合镀或物理气相沉积镀在磁体表面沉积 Ni、

* 安徽省教育厅自然科学基金资助项目(KJ2009B050);安徽工业大学青年教师资助项目(QZ200804)

** 冒爱琴(1978-),女,硕士,讲师。E-mail:maoaiqin@ahut.edu.cn

收稿日期:2009-04-10

Zn、Al、Ni-P、Ni-Fe、Cu、Cr、TiN、ZrN 等金属或化合物来提高耐腐蚀性,其中应用最广泛的金属镀层是 Ni 及 Ni 合金。对于在恶劣环境下使用的磁体,采用聚合物涂层等有机涂层、化学热处理或转化膜法^[10-11]进行防腐。

国内许多学者对化学镀 Ni-P 合金及防腐性能进行了研究,表明酸性 Ni-P 合金的防腐性能好于碱性的 Ni-P 合金^[12]。由于 NdFeB 永磁体是采用粉末冶金工艺生产,表面有大量的孔隙、疏松且表面质量不均匀,不仅难以上镀,而且孔隙中残留酸液、镀液影响镀层与基体的结合力,容易起皮脱落;合金成分中的 Nd 易在潮湿的空气及溶液中氧化,并与酸产生强烈的反应,严重时可由于大量 Nd 的氧化物或氢化物的形成而粉化。清华大学钟声等^[13]首先采用分离酸性化学镀方法在 TiNi/Ti/SiO₂/Si 基板的 TiN 进行化学镀,而后采用碱性化学镀 Cu 方法制造 Cu 膜,即对酸、碱结合化学镀 Cu 方法进行了研究。笔者通过化学封孔并利用碱液对基体腐蚀性小的特点,先在烧结型 NdFeB 永磁材料表面预镀一层弱碱性镀层作为基底,然后再在酸性条件下进行化学镀,即采用二次化学镀工艺,并通过静态全浸腐蚀试验、测定单位表面积孔隙数量等手段比较了二次化学镀层的耐腐蚀性。

1 试验

1.1 NdFeB 预处理

表1 酸性镀液组成和工艺条件

Table 1 Composition of acidic solution and process conditions

组成(质量浓度)/(g·L ⁻¹)				工艺参数	
NiSO ₄ ·7H ₂ O	NaH ₂ PO ₂ ·H ₂ O	CH ₃ COONa	(NH ₂) ₂ C ₅	pH 值	温度/℃
50	60	40	2×10 ⁻³	4.7	90

由于碱性预镀是与基体结合最紧密的一层,它作为酸性镀的基底,对整个镀层的各种物理化学性能,如单位表面积的孔隙数量、增重量、耐蚀性、结合力、光亮度等都有显著的影响。因此,通过沉积速率和单位表面积的孔隙数量的测定,得出碱性预镀优化后的配方。

1.3 性能测试方法

1.3.1 沉积速率

采用单位面积镀层质量的增重来间接表征沉积速率。

烧结型 NdFeB 永磁材料的规格为:10mm×10mm×2mm。预处理工艺的流程为:试样打磨→水洗→封孔→水洗→化学除油→水洗→除锈→水洗→活化→水洗→碱性化学预镀→水洗→酸性化学镀。

打磨:先用砂轮机抛光,然后用 400#细砂纸进行端面磨光,最后用抛光机抛光直至表面光亮平滑。

封孔:采用化学封孔,取一定量的四硼酸钠放入蒸馏水中,然后加入非离子表面活性剂吐温-80 于其中;煮沸后,将试样投入沸液中,浸煮 30min 后捞出,放入有机金属铜盐溶液中进行化学封孔处理,浸泡 15min。

化学除油的目的主要是去除抛光膏等油脂或污物。除油液组成为: $\rho(\text{Na}_2\text{CO}_3) = 50\text{g/L}$, $\rho(\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}) = 70\text{g/L}$, $\rho(\text{NaOH}) = 10\text{g/L}$,用乙酸调节 pH 值在 9~10 的范围,温度为 85℃,时间 3~5min。

酸洗活化:利用弱腐蚀作用,除去 NdFeB 表面的氧化物薄层,使其表面有轻微的刻蚀。活化工艺条件为: $\rho(\text{磺基水杨酸}) = 20 \sim 25\text{g/L}$,室温,时间为 30~40s。

1.2 镀液配方及施镀工艺

酸性镀液配方参考文献[14-16]中的相关数据,通过大量试验对比分析,得出优化后的配方如表1所示。在该酸性配方中,硫酸镍是主盐、次亚磷酸钠是还原剂、乙酸钠是络合剂、硫脲[(NH₂)₂C₅]是稳定剂。

$$V = (m_2 - m_1) / S \quad (1)$$

式中: V 为单位面积内镀层的增重量,mg/cm²; m_1 为镀前镀件质量,mg; m_2 为镀后镀件质量,mg; S 为镀件面积,cm²。

1.3.2 单位表面积的孔隙数量

采用湿式贴纸法,用浸过铁氰化钾(10g/L)加氯化钠(20g/L)试液的试纸贴在试样表面,5min 后揭去试纸,水洗干燥后,计算蓝点数目。

$$P = n / S \quad (2)$$

式中: P 为单位表面积的孔隙数量,个/cm²; n

为蓝色点数; S 为受检面积, cm^2 。

1.3.3 静态全浸泡腐蚀试验

采用静态全浸泡腐蚀试验方法, 将样片完全浸泡在腐蚀介质为 10% (体积分数) HCl 、3.5% (质量分数) NaCl 溶液和 20% (质量分数) NaOH 溶液中, 恒温 25℃, 浸泡 210h。测定腐蚀前后样品的质量, 通过公式求出镀层单位面积平均腐蚀速率。

单位面积平均腐蚀速率 = (试样腐蚀前质量 - 试样腐蚀后质量) / (腐蚀时间 · 试样面积)

2 碱性镀液组成及工艺条件的确定

2.1 镀覆时间的确定

施镀时间主要影响镀层厚度, 但与镀层厚度并不成正比; 随着施镀时间的增加, NdFeB 表面沉积的金属镍的量也在增加, 但镀液中次亚磷酸盐含量不断减少, 镀速下降。在其它条件不变的情况下, 镀层增重量、单位面积的孔隙数量与镀覆时间的关系见图 1。

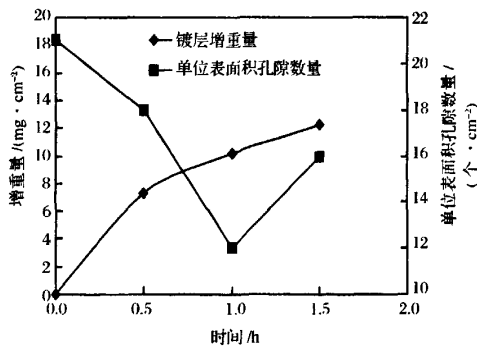


图 1 单位面积的增重量及单位面积的孔隙数量与时间的关系

Fig.1 Relation between the weight gain, the number of pore per area and time

由图 1 可知, 随着镀覆时间的延长, 沉积速率不断增加, 镀层也不断变厚。在刚开始的半小时内曲线的斜率较大, 表明这段时间内沉积速率较高, 之后曲线的斜率基本保持不变; 而单位面积孔隙数量在起镀后的 1h 内随时间的延长而减小, 超过 1h 后单位面积的孔隙数量反而变大。综合考虑沉积速率与单位面积的孔隙数量这两个因素, 确定最佳镀覆时间为 1h。

2.2 温度的确定

在一定温度范围内, 升高温度可以提高镀速; 但

温度高、镀速快, 导致镀层中含磷量下降, 从而影响镀层性能, 同时镀层的应力和单位面积孔隙数量也会增加, 这样就会降低耐蚀性能, 并且还会使镀液变得不稳定, 自然分解倾向增加^[16]。当镀覆时间为 1h 时, 镀层的增重量、单位面积的孔隙数量与温度的关系如图 2 所示。

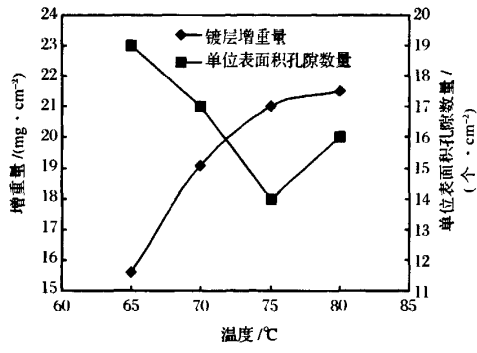


图 2 单位面积的增重量及单位面积的孔隙数量与温度的关系

Fig.2 Relation between the weight gain, the number of pore per area and temperature

从图 2 可知, 沉积速率随温度升高而增大。这是由于温度越高, 离子扩散能力越大, 反应活性加强, 反应速度越快。在 85℃ 和 90℃ 的温度下也进行了化学镀试验, 发现温度越高, 反应越剧烈。起镀 20min 后, 镀液出现浑浊现象并产生絮状物, 同时在烧杯底部沉积上少量金属层; 镀层的单位面积孔隙数量在 75℃ 左右出现一个最低值。综合考虑温度对单位面积的孔隙数量和沉积速率的影响, 确定最佳镀覆温度为 75℃。

2.3 pH 值的确定

pH 值对镀层的内应力、磷含量、结合力等都有影响^[17]。如果 pH 值过低, 会使镀层粗糙, 产生毛刺; 当 pH 值过高时, 镀液分散能力差, 镀层出现起泡、脱皮、针孔等现象。所以 pH 值应该控制在最佳值。当镀覆时间为 1h 时, 镀层的增重量、单位面积的孔隙数量与 pH 值的关系如图 3 所示。

从图 3 可以看出, 当 pH 值约等于 9.0 时, 镀层的沉积速率高, 单位面积的孔隙数量最小。因此, 可以确定碱性镀的最佳 pH 值为 9.0 左右。

2.4 主盐与还原剂浓度比的确定

影响沉积速率的因素不单是主盐或者还原剂各自的浓度, 最主要的是它们的浓度比。当 Ni^{2+} 与

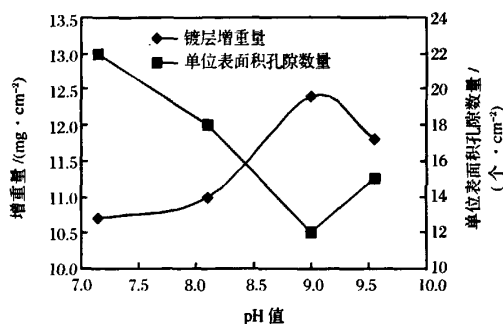


图3 单位面积的增重量及单位面积的孔隙数量与 pH 值的关系

Fig.3 Relation between the weight gain, the number of pore per area and pH value

H_2PO_2^- 摩尔浓度比在 0.25 ~ 0.80 之间时,沉积速率较高^[18],取 0.30 ~ 0.45 则达到最高值。一般溶液配方中镍盐的浓度维持在 20 ~ 40g/L。所以在本试验中,主盐及还原剂浓度分别取: $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 为 33g/L, $\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 为 17g/L。

2.5 稳定剂用量的确定

本试验中,以硫脲作为稳定剂。稳定剂用量过少,会导致镀液不稳定;同时稳定剂又是一种毒化剂,用量过多反而会降低镀速,使沉积速率降低,甚至镀不上。当镀覆时间为 1h 时,镀层的增重量、单位面积的孔隙数量与稳定剂用量的关系见图 4。

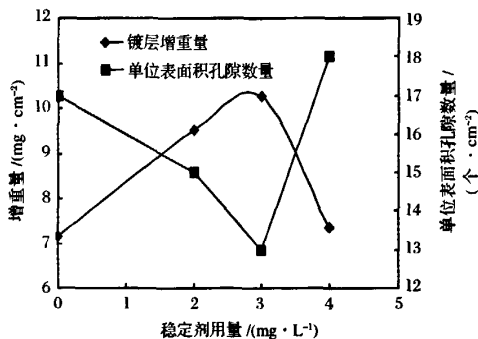


图4 单位面积的增重量及单位面积的孔隙数量与稳定剂用量关系

Fig.4 Relation between the weight gain, the the number of pore per area and stabilizing agent concentration

从图 4 可知,当稳定剂的用量在 2.5 ~ 3.1mg/L 时,镀层沉积速率达到最大;同时在此范围内镀层单位面积的孔隙数量小。综合考虑稳定剂用量与镀层沉积速率、单位面积的孔隙数量的关系,确定稳

定剂的最佳用量为 3mg/L。

2.6 络合剂柠檬酸钠用量的确定

络合剂可以降低溶液中自由离子的浓度和平衡电位,同时和镀件表面接触吸附,提高镀件表面的活性,加速次亚磷酸盐释放出氢原子^[17]。当镀覆时间为 1h 时,镀层的增重量、单位面积的孔隙数量与络合剂用量的关系见图 5。

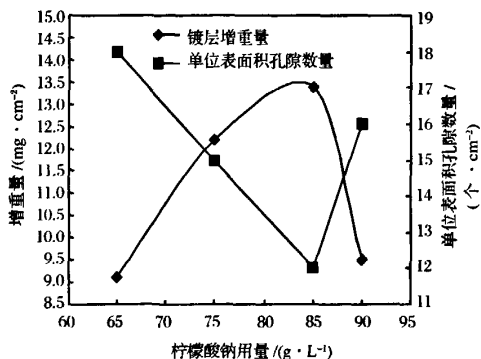


图5 单位面积增重量及单位面积的孔隙数量与柠檬酸钠用量的关系

Fig.5 Relation between the weight gain, the number of pore per area and CH_3COONa concentration

络合剂的加入既要考虑络合镍离子的能力,也要充分考虑镀液的沉积速率,以保持络合剂各组分的恰当配比。从图 5 可以看出,当柠檬酸钠的用量为 85g/L 左右时,镀层的沉积速率最大,单位面积的孔隙数量最小。因此,可以确定以柠檬酸钠为络合剂时,其最佳用量为 85g/L。

经过上述试验得出了碱性预镀的优化配方为: $\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 33g/L, $\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 17g/L, 柠檬酸钠 85g/L, 硫脲 3mg/L, pH 值为 9.0, 温度 75℃, 时间为 1h。

3 镀层耐腐蚀性能分析

本试验采用上述酸碱化学镀工艺,在 NdFeB 永磁体表面分别制备了酸性镀液下的 Ni-P 镀层、碱性镀液下的 Ni-P 镀层和二次化学镀(先碱性镀后酸性镀)的 Ni-P 镀层,并通过单位面积的孔隙数量和静态全腐蚀试验比较了耐腐蚀性能。

3.1 单位面积的孔隙数量测试

表 2 为化学镀处理后的 NdFeB 永磁体以及未经处理的 NdFeB 基体的单位面积的孔隙数量的试验结果。

表 2 试样单位面积的孔隙数量
Table 2 The porosity of samples

样品	NdFeB 基体	酸性 镀层	碱性 镀层	二次化学 镀镀层
单位面积的孔隙数量/ (个·cm ⁻²)	21	12	8	5

从表 2 可以看出, NdFeB 永磁体经化学镀处理后单位面积的孔隙数量明显降低, 即镀层的致密程度增加。酸性镀层的单位面积的孔隙数量大于碱性镀层, 复合镀层的单位面积的孔隙数量最小, 只有 5 个/cm²。这是因为 NdFeB 永磁体在碱液中的耐腐蚀性很好, 而在酸液中腐蚀很快(见表 3), 同时, 酸性条件下获得的 Ni-P 镀层具有优良的耐腐蚀性^[18]。所以, 先对 NdFeB 永磁体施以弱碱性化学镀, 能降低基体的单位面积的孔隙数量; 再施以酸性化学镀, 能大幅度提高 NdFeB 永磁体的耐腐蚀性能。

3.2 静态全浸腐蚀试验

表 3 为化学镀处理后的不同类型 NdFeB 永磁体以及未经处理的 NdFeB 基体在中性、酸性和碱性溶液中的静态全浸腐蚀试验结果。

表 3 试样在不同介质中的腐蚀速率(室温)

Table 3 Corrosion rate of samples in different solutions
(room temperature)

样品	腐蚀速率/(mg·cm ⁻² ·h ⁻¹)		
	10% HCl	3.5% NaCl	20% NaOH
NdFeB 基体	232	3.05 × 10 ⁻²	2.46 × 10 ⁻³
酸性镀层	3.72	4.27 × 10 ⁻³	(忽略不计)
碱性镀层	5.23	6.53 × 10 ⁻³	(忽略不计)
二次化学镀镀层	3.46	3.78 × 10 ⁻³	(忽略不计)

从表 3 可以看出: NdFeB 永磁体在碱液中的耐腐蚀性很好, 在体积分数为 10% 的盐酸中腐蚀很快; 而 Ni-P 镀层能显著改善磁体的耐腐蚀性, 使腐蚀速率降低了约 97% ~ 100%; 在 3.5% 的 NaCl 溶液中化学镀处理后的耐腐蚀性能提高了 79% ~ 88%。试验表明, 经化学镀处理后磁体的耐腐蚀性有了较大改善, 酸碱二次化学镀试样的腐蚀速率最低, 其次是酸性镀试样, 然后是碱性镀试样, 即二次化学镀后试样的耐腐蚀性高于单一镀层的试样。

4 结论

1) NdFeB 磁体表面碱性预镀的优化配方为: Ni-SO₄·6H₂O 33g/L, NaH₂PO₂·H₂O 17g/L, 柠檬酸钠

85g/L, 硫脲 3mg/L, pH 值为 9.0, 温度 75℃, 时间为 1h。

2) 化学镀 Ni-P 合金能显著改善 NdFeB 永磁体的单位面积的孔隙数量和耐腐蚀性; 且以弱碱性化学镀为底层, 酸性化学镀为表层的二次化学镀工艺使 NdFeB 永磁体表面镀层的致密度和耐腐蚀性能最佳; 而单一的酸性镀层的耐腐蚀性又优于碱性镀层。

参考文献

[1] 周寿增. 稀土永磁材料及其应用. 北京: 冶金工业出版社, 1990: 351-378

[2] Gurrappa I, Pandian S. Corrosion characteristics of Nd-Fe-B permanent magnets in different environments. Corrosion Engineering, Science & Technology, 2006, 41(1): 57-61

[3] Yu L Q, Wen Y H, Yan M. Effects of Dy and Nb on the magnetic properties and corrosion resistance of sintered NdFeB. Journal of Alloys and Compounds, 2003, 360: 236-242

[4] 戴长松, 吴宜勇, 王殿龙, 等. 稀土永磁材料钕铁硼的化学镀 Ni-P 合金. 材料保护, 1997, 30(7): 20-21

[5] Ma C B, Cao F H, Zhang Z, et al. Electrodeposition of amorphous Ni-P coatings onto Nd-Fe-B permanent magnet substrates. Applied Surface Science, 2006, 253(4): 2251-2256

[6] Zheng Jingwu, Jiang Meiyun, Qiao Liang, et al. Surface modification of spherical NdFeB magnetic powders by a fluid-bed nickel electrodeposition. Materials Letters, 2008, 62(28): 4407-4409

[7] Yu Shengxue, Chen Ling. Preparation technology and performances of Zn-Cr coating on sintered NdFeB permanent magnet. Journal of Rare Earths, 2006, 24(2): 223-226

[8] Shan Guan, Bradley Nelson J. Fabrication of hard magnetic microarrays by electroless codeposition for MEMS actuators. Sensors and Actuators A: Physical, 2005, 118(2): 307-312

[9] 严密, 张小星, 吴磊. 超声化学镀对烧结钕铁硼磁体抗腐蚀性能的影响. 中国腐蚀与防护学报, 2006, 26(2): 100-102

[10] Tamborim Takeuchi S M, Azambuja D S, Saliba-Silva A M, et al. Corrosion protection of NdFeB magnets by phosphating with tungstate incorporation. Surface & Coatings Technology, 2006, 200(24): 6826-6831

[11] Tamborim Takeuchi S M, Azambuja D S, Costa I. Cerium conversion layer for improving the corrosion resistance of phosphated NdFeB magnets. Surface & Coatings Technology, 2006, 201(6): 3670-3675

[12] 吴磊, 严密, 应华根, 等. NdFeB 磁体表面化学镀 Ni-P 合金防腐研究. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(8): 1398-1402

[13] 钟声, 李厚民, 杨志刚, 等. 碱性化学镀铜以及酸、碱结合化学镀铜方法研究. 稀有金属材料与工程, 2006, 35(9): 1428-1431

[14] 冒爱琴. 金刚石表面化学镀 Ni-P 的研究. 粉末冶金技术, 2008, 26(1): 15-18

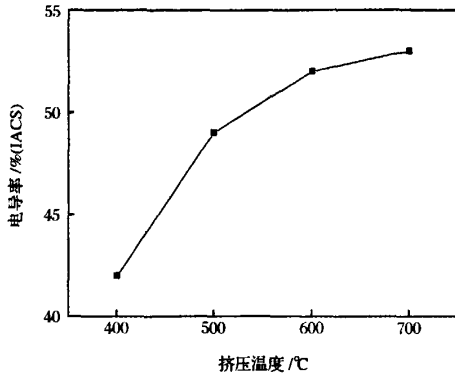


图8 球磨10h的Cu-5%Cr以挤压比4在不同温度下热静液挤压棒材的电导率

Fig.8 Electrical conductivity of rods hot-hydrostatic extruded at different temperatures with extrusion ratio 4 of Cu-5% Cr powders milled for 10h

米晶Cu-5%Cr粉末接近完全致密化。最佳的热静液挤压工艺参数为挤压温度600℃、挤压比4。球磨10h的Cu-5%Cr合金粉末经400℃热压制坯和600℃、挤压比4热静液挤压后相对密度达到99.3%。

3)热静液挤压致密化后的Cu-5%Cr合金的晶粒有所长大,Cu基体的平均晶粒尺寸达到了500nm左右,变成了亚微米晶材料。

4)采用最佳工艺参数热静液挤压得到的亚微米晶Cu-5%Cr合金具有较好的性能,抗拉强度达到495MPa、伸长率达到5.8%、电导率达到52%(IACS)。

参考文献

[1] Morris M A, Morris D G. Microstructures and mechanical properties of rapidly solidified Cu-Cr alloys. *Acta Metall*, 1987, 35: 2511 - 2522

[2] Hu Lianxi, Wang Erde. Fabrication of high strength conductivity submicron crystalline Cu-5% Cr alloy by mechanical alloying. *Trans Nonferrous Met Soc China*, 2000, 10: 209 - 212

[3] Morris D G, Morris M A. Mechanical alloying of copper-BCC element mixtures. *Scr Met Mater*, 1990, 24 (9): 1701 - 1706

[4] Morris D G, Morris M A. Rapid solidification and mechanical alloying techniques applied to Cu-Cr alloys. *Mater Sci Eng A*, 1988, A104: 201 - 213

[5] Morris M A, Morris D G. Microstructural refinement and associated strength of copper alloys obtained by mechanical alloying. *Mater Sci Eng A*, 1989, A111: 115 - 127

[6] Raghu T, Sundaresan R, Ramakrishnan P, et al. Synthesis of nanocrystalline copper-tungsten alloys by mechanical alloying. *Mater Sci Eng A*, 2001, A304: 438 - 441

[7] Liu Jinglei, Liu Zuyan, Wang Erde. Structures, properties and responses to heat treatment of deformation processed Cu-15wt % Cr composite powders prepared by mechanical milling. *Trans Nonferrous Met Soc China*, 2002, 12 (6): 837 - 840

[8] Liu Jinglei, Wang Erde, Liu Zuyan. Phases interface in deformation processed Cu-15% Cr composite prepared by elemental powders. *Mater Sci Eng A*, 2004, A382: 301 - 304

[9] 胡丽平. 静液挤压技术的研究现状. *金属成形工艺*, 1995, 13 (6): 40

[10] Inoue N, Nishara M. Hydrostatic extrusion-theory and application. Elsevier Applied Science Publisher Ltd, 1985: 63 - 71

[11] 柯尔巴什尼科夫 A N. 金属材料的热静液挤压. 薛永春, 周光垓, 译. 北京: 国防工业出版社, 1984

[12] Liang Guoxian, Li Zhichao, Wang Erde. Hot hydrostatic extrusion of mechanically alloyed Al-4.9Fe-4.9Ni powders. *J Mater Sci Tech*, 1994, 10(4): 285 - 288

[13] Liang Guoxian, Li Zhichao, Wang Erde. Consolidation of Al-10Ti nanocrystalline powders synthesized by mechanical alloying. *Nanostructure Materials*, 1995, 5: 100 - 103

[14] Liang Guoxian, Li Zhichao, Wang Erde, et al. Structural change of rapidly solidified 2024 aluminum alloy powders in mechanical milling and subsequent consolidation process. *J Mater Proc Tech*, 1996, 58(2/3): 247 - 250

[15] 张国锋, 李自民, 王尔德, 等. 机械合金化Cu-5Cr合金的组织性能研究. *粉末冶金技术*, 1996, 14(3): 175 - 180

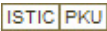
(上接第327页)

[15] 冒爱琴. 金刚石化学镀Ni-P涂层高温抗氧化性的研究. *稀有金属*, 2008, 32(3): 311 - 314

[16] 姜晓霞, 沈伟. 化学镀理论与实践. 北京: 国防工业出版社, 2000: 124 - 187

[17] 沃尔夫冈·里德尔. 化学镀镍. 罗守福, 译. 上海: 上海交通大学出版社, 1996: 36 - 53

[18] 白永刚, 王引真, 宋玉强. 高温热处理对高磷Ni-P化学镀层耐腐蚀性的影响. *表面技术*, 2003, 32(2): 26 - 30

作者: 冒爱琴, Mao Aiqin
作者单位: 安徽工业大学材料科学与工程学院, 安徽马鞍山, 243002; 安徽省金属材料与加工重点实验室, 安徽马鞍山, 243002
刊名: 粉末冶金技术 
英文刊名: POWDER METALLURGY TECHNOLOGY
年, 卷(期): 2010, 28(5)

参考文献(18条)

1. 周寿增. 稀土永磁材料及其应用. 1990
2. Gurrappa I, Pandian S. Corrosion characteristics of Nd-Fe-B permanent magnets in different environments. 2006(1)
3. Yu L Q, Wen Y H, Yan M. Effects of Dy and Nb on the magnetic properties and corrosion resistance of sintered NdFeB. 2003
4. 戴长松, 吴宜勇, 王殿龙. 稀土永磁材料钕铁硼的化学镀Ni-P合金. 1997(7)
5. Ma C B, Cao F H, Zhang Z. Electrodeposition of amorphous Ni-P coatings onto Nd-Fe-B permanent magnet substrates. 2006(4)
6. Zheng Jingwu, Jiang Meiyan, Qiao Liang. Surface modification of spherical NdFeB magnetic powders by a fluid-bed nickel electrodeposition. 2008(28)
7. Yu Shengxue, Chen Ling. Preparation Technology and Performances of Zn-Cr Coating on Sintered NdFeB Permanent Magnet. 2006(2)
8. Shan Guan, Bradley Nelson J. Fabrication of hard magnetic microarrays by electroless codeposition for MEMS actuators. 2005(2)
9. 严密, 张小星, 吴磊. 超声化学镀对烧结钕铁硼磁体抗腐蚀性能的影响. 2006(2)
10. Tamborim Takeuchi S M, Azambuja D S, Saliba-Silva A M. Corrosion protection of NdFeB magnets by phosphating with tungstate incorporation. 2006(24)
11. Tamborim Takeuchi S M, Azambuja D S, Costa I. Cerium conversion layer for improving the corrosion resistance of phosphated NdFeB magnets. 2006(6)
12. 吴磊, 严密, 应华根, 吴进明, 罗伟. NdFeB磁体表面化学镀Ni-P合金防腐研究. 2007(8)
13. 钟声, 李厚民, 杨志刚, 王静. 碱性化学镀铜以及酸、碱结合化学镀铜方法研究. 2006(9)
14. 冒爱琴. 金刚石表面化学镀Ni-P的研究. 2008(1)
15. 冒爱琴. 金刚石化学镀Ni-P涂层高温抗氧化性的研究. 2008(3)
16. 姜晓霞, 沈伟. 化学镀理论与实践. 2000
17. 沃尔夫冈·里德尔, 罗守福. 化学镀镍. 1996
18. 白永刚, 王引真, 宋玉强. 高温热处理对高磷Ni-P化学镀层耐蚀性的影响. 2003(2)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_fmyjjs201005001.aspx