

添加剂和电流密度对镍钴合金电铸层组织结构的影响

Influences of Additive and Current Density on the Microstructure of the Electroforming Ni-Co Alloy

裴和中¹, 黄攀¹, 史庆南¹, 陆峰², 张俊³, 张国亮¹

(1 昆明理工大学 材料科学与工程学院, 昆明 650093; 2 北京航空材料研究院, 北京 100095; 3 云南驰宏锌锗股份有限公司, 昆明 650093)

PEI He-zhong¹, HUANG Pan¹, SHI Qing-nan¹, LU Feng², ZHANG Jun³, ZHANG Guo-liang¹

(1 Faculty of Materials Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China; 2 Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China; 3 Yunnan Chihong Zn&Ge Co., Ltd., Kunming 650093, China)

摘要: 研究了添加剂、电流密度对镍钴合金电铸层应力和钴含量的影响。采用 SEM、能谱仪和 X 射线衍射分析了添加剂和电流密度对铸层形貌及微观结构的影响。结果表明: 添加剂 TN2 能够使铸层产生压应力; TN3 能够使铸层产生张应力, TN3 与 TN2 配合使用, 能够使铸层应力达到平衡值零。电流密度增加时, 当电流密度小于 $6\text{A}/\text{dm}^2$ 时, 铸层应力随之增加; 当电流密度大于 $6\text{A}/\text{dm}^2$ 时, 铸层应力随之减小。添加剂对铸层钴含量影响不明显而电流密度对铸层钴含量的影响较明显; TN2、TN3 的加入能够使铸层更平滑、晶粒细致紧密。添加剂 TN2 对衍射峰(200)影响较大, 对晶面具有一定的选择性; 添加剂 TN3 对晶面具有较强的选择性, 易在(200)面吸附, 抑制其生长, 此时晶体的生长方向主要为[100]。随着电流密度的增大, 衍射峰出现宽化的趋势。

关键词: 电铸镍钴合金; 添加剂; 电流密度; 应力; 钴含量; 组织形貌

doi: 10.3969/j.issn.1001-4381.2013.06.004

中图分类号: TQ153.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2013)06-0018-07

Abstract: The influences of additives and current density on the stress and cobalt content of nickel-cobalt alloy electroforming layer were studied. The effects of additives and current density to the morphology and microstructure of nickel-cobalt alloy electroforming layer were investigated by SEM, EDS and X-ray diffraction. The results showed that compressive stress was generated in the electroforming layer when the additive TN2 added in the electroforming solution; the additive TN3 could make tensile stress. So electroforming layer might have a balance of zero stress by adding TN2 and TN3 together. When the current density was less than $6\text{A}/\text{dm}^2$, the stress of electroforming layer increased along with the current density; when the current density was greater than $6\text{A}/\text{dm}^2$, the stress of electroforming layer decreased along with the current density. The additives' influence on the cobalt content of electroforming layer was not obvious. The current density's influence on the cobalt content of electroforming layer was more obvious. Smoother and finer grain could be acquired when the TN2 or TN3 added in the electroforming solution. The additive TN2 had a large effect on the diffraction peak(200) and certain selectivity to the crystal face. The additive TN3 had a strong selectivity to the crystal face, easily adsorbed on the (200) surfaces to inhibit their growth, so the crystal growth direction was mainly [100]. With the current density increasing, the diffraction peak had the widening trend.

Key words: electroforming nickel-cobalt alloy; additive; current density; stress; cobalt content; morphology

电铸技术因其高精度成型性、好的复制性、周期短等特点而广泛应用于航空航天、兵器、精密模具以及机械等制造领域^[1-4]。镍钴合金电铸层由于具有良好的物理、化学及力学性能如:高硬度、高耐磨性、高耐蚀性、良好的导热性以及电催化性而广泛应用于电铸技术中^[5]。镍钴合金铸层可以通过硫酸盐、氯化物、氨基磺酸盐等体系中获得^[6],对于应力、组织结构及钴含量的要求较高,而添加剂的选择及其含量对电铸镍钴合金铸层的组织与性能的影响很大;随着电流密度的变化镍钴合金铸层的钴含量、内应力及组织形貌都在不断地变化;目前对于镍钴合金电铸层组织、性能与添加剂及电流密度之间的关系的研究较少,深入研究添加剂及电流密度对钴含量和应力影响的文献也鲜有报道。

本工作通过实验及运用相关理论来探讨添加剂和电流密度对镍钴合金电铸层应力、钴含量影响,并通过SEM、能谱仪和X射线衍射来分析添加剂和电流密度对电铸层形貌及微观结构的影响,从而丰富了镍钴合金电铸领域中关于添加剂和电流密度对镍钴合金电铸层组织结构影响的研究。

1 实验

1.1 实验材料及电铸工艺

实验材料:硫酸镍(AR)、硫酸钴(AR)、氯化钠(AR)、十二烷基硫酸钠(AR)、氢氧化钠(AR)、硼酸(AR)、硝酸(AR)、TN1(含N的弱酸,主要是提高铸液的分散能力)、TN2(含N,S的有机物)、TN3为含羟基的有机物等;实验中以硬铝合金为芯模材料。

电铸工艺:硫酸镍 300~350g/L,硫酸钴 10g/L,硼酸 40g/L,氯化钠 20g/L,十二烷基硫酸钠 0.05~0.1g/L,TN1:15g/L,TN2:0.15g/L,TN3:0.5g/L,pH:4~5, T :55~65℃,电源波形为全波,磁力搅拌。

1.2 铸层应力的测量

采用薄片阴极弯曲法^[7]测定电铸层的内应力,阴极采用铝箔片(厚度:0.04mm),其弹性模量 $E=70000\text{MPa}$ ^[8]。实验前铝箔经清洗、干燥、静压碾平,背面做绝缘处理。实验槽尺寸为120mm×70mm×60mm;阴阳极间距离固定为8cm。首先,在实验条件下电铸一定的时间,测出铸层厚度 t 、阴极长度 L 以及下端偏移量 Z' ,然后按以下公式计算铸层的内应力:

$$P = \frac{E \times T^2 \times Z'}{3t \times L^2} \quad (1)$$

式中: P 为电铸层内应力(MPa); E 为阴极弹性模量(MPa); T 为阴极厚度(mm); t 为电铸层厚度(mm);

Z' 为阴极下端偏移量(mm); L 为阴极长度(mm)。

1.3 SEM、能谱仪和XRD

用EDAX公司的Genesis Apex能谱仪测定铸层钴含量,由于芯模是在流动的铸液中并伴随着自身自转的情况下进行电铸的,因此芯模表面铸层钴含量的分布是均匀的;用JSM-6380LV SEM观察铸层的表面形貌;采用3015升级型X射线衍射仪(XRD)对电铸在 $\phi 15\text{mm} \times 5\text{mm}$ 的铝棒上的铸层($100\mu\text{m}$)进行微观结构的分析。

2 结果与讨论

2.1 添加剂和电流密度对铸层应力的影响

当TN1为10g/L,电流密度为 $5\text{A}/\text{dm}^2$ 时,添加剂TN2和TN3的含量与铸层应力的关系如图1所示,从图1可以看出:随着TN2浓度的增加,铸层应力越来越小,当其含量为0.06~0.08g/L时,铸层应力达到最小值。表明了TN2能够使铸层产生压应力,从而抵消了原铸层中的张应力,即宏观表现为应力值减小,随着TN2浓度增加到0.07g/L左右时,铸层产生的压应力基本可以平衡原铸层中的拉应力,宏观表现为铸层应力基本为零;随着TN3浓度的增加,铸层应力越来越大,当其含量小于0.1g/L时,铸层应力基本保持在零左右;当其含量大于0.1g/L时,铸层应力与其含量基本呈线性关系。表明了添加剂TN3能够使铸层产生张应力,随其浓度的增加,张应力会不断增加即铸层应力不断升高。所以添加剂TN3需与TN2配合使用,当它们的浓度达到两条曲线的交点处(0.07g/L)时,TN2产生的压应力与原铸层及TN3产生的张应力相互抵消,此时铸层应力达到平衡值零。

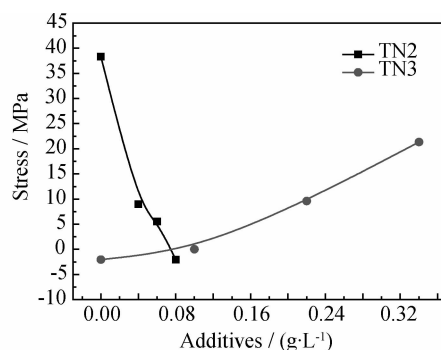


图1 添加剂TN2与TN3对铸层应力的影响
Fig. 1 The impacts of additives TN2 and TN3 on the electroforming layer's stress

根据El-Sherik等的观点^[9],应力的产生主要来源于三个方面:(1)基体与镀层之间热膨胀系数的差异而

造成的热应力;(2)镀层与基体或者镀层内部的晶格错配而产生的畸变能所导致的应力;(3)电镀参数以及镀液成分造成的残余应力或者本真应力。对于本实验来说,基体和铸层的结构可认为基本不变,唯一改变的是铸液的成分,那么添加剂对铸层应力的影响主要源于铸层晶格错配的改变或者镀液成分造成的残余应力;不同添加剂的加入可能导致铸层内部形成不同结构的金属间化合物从而产生晶格错配导致畸变能的差异引起不同应力的产生;镀液中添加剂的不同也可能导致铸层中不同有机物夹杂而造成不同应力的产生。虽然,目前对于添加剂对应力的作用机理还没有固定的说法,但是,一般认为是添加剂中的 C,N,S 等的夹杂所造成的,而它们是如何影响,以及影响规律都还不清楚,所以目前对添加剂的选择大多都还是靠经验。

电流密度对铸层应力的影响,如图 2 所示。当电流密度小于 6 A/dm^2 时,铸层应力随着电流密度的增加而增加;当电流密度大于 6 A/dm^2 时,铸层应力随着电流密度的增加而减小;铸层应力随电流密度的变化趋势可能与铸层结构和晶粒大小有关;低电流密度时,随着电流密度的增加,双电层极化增大,阴极表面放电离子和电子的浓度增加,此时,阴极表面形核率升高,晶核数增加,晶粒细小,结构紧密,铸层应力相应的增加;同时,随着电流密度的增加析氢也随着增加,从而造成氢元素的夹杂;当电流密度过大时,阴极离子析出过快,尖端效应过于明显,将导致晶粒局部长大,铸层结构松散,应力呈下降趋势。

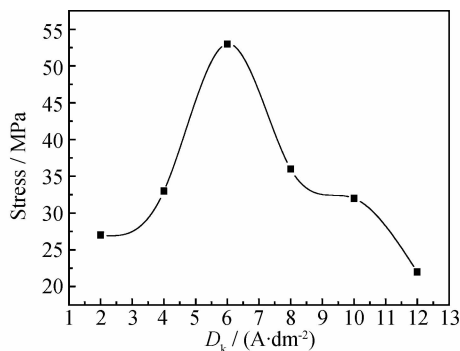


图 2 电流密度对铸层应力的影响

Fig. 2 The influence of the current density on the electroforming layer's stress

2.2 添加剂和电流密度对铸层钴含量的影响

在不改变铸液中钴离子浓度的情况下,随添加剂种类和添加量的变化,铸层钴含量呈现先增大后减小的趋势,但是变化范围并不大,铸层钴含量总体上基本保持不变,如图 3 所示。这可能与添加剂在电铸过程中的作用机理有关。在加入配位剂后能够使镍

(-0.23 V)、钴(-0.27 V)的过电位更加接近,有利于共沉积。当再加入添加剂时,不仅能够使它们的过电位进一步接近,更有利于镍钴合金的共沉积,而且能够在阴极表面吸附,形成紧密的吸附层来阻化金属配位离子的放电过程或金属吸附原子的表面扩散,使阴极反应的超电压升高,电极反应速率减慢,从而获得晶粒细小、光亮平滑的铸层。当添加剂的添加量较小时,添加剂在阴极形成的吸附层比较薄,对金属配位离子的阻化作用弱,但它能够使镍、钴的过电位更加接近,有利于镍钴合金的共沉积,故随着添加剂的增加,铸层钴含量略微增加;当添加剂的添加量较大时,添加剂在阴极形成的吸附层很紧密,对金属配位离子的阻化作用比较强,此时,阴极反应速率减慢,铸层晶粒细小,但不利于镍钴合金的沉积,故铸层钴含量略有下降。

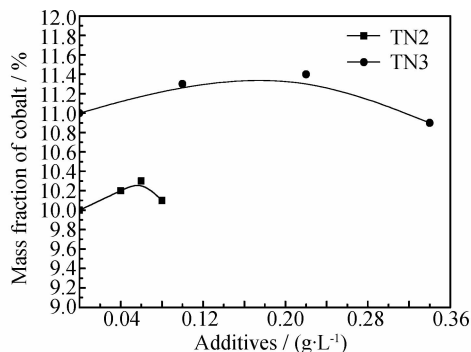


图 3 添加剂(TN2, TN3)对铸层钴含量的影响

Fig. 3 The impacts of the additives TN2 and TN3 on the cobalt content

电流密度对铸层钴含量的影响较明显,随着电流密度的增大,铸层钴含量呈下降趋势,如图 4 所示。电流密度的增大,会同时引起镍、钴在阴极表面沉积时产生浓差极化,但是作用程度不同;根据文献[10],[11]:

$$\eta_k = \frac{RT}{anF} \ln \frac{D_k}{i^0} + \frac{RT}{anF} \ln \left(1 - \frac{D_k}{D_L} \right) \quad (2)$$

$$D_L = nFK \frac{C_1^0}{\delta} \quad (3)$$

式中: η_k 为阴极极化电位; α 为阴极反应的“传递系数”,为小于 1 的正数; n 为反应粒子的电荷数; F 为法拉第常数; i^0 为交换电流密度; D_k 为阴极净电流密度; D_L 为阴极极限扩散电流密度; C_1^0 为反应粒子在电解液主体部位的浓度; δ 为扩散层的有效厚度; K 为扩散系数,对于大多数离子 $K \approx 1 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$;式(2)中,右边表示电化学极化对阴极极化值的贡献,取决于 i^0 与 D_k 的相对大小;第二项表示浓度极化对阴极极化值的贡献,取决于 D_k 与 D_L 的相对大小。

图 5 是由式(2)所表示的极化曲线特征图,图中虚

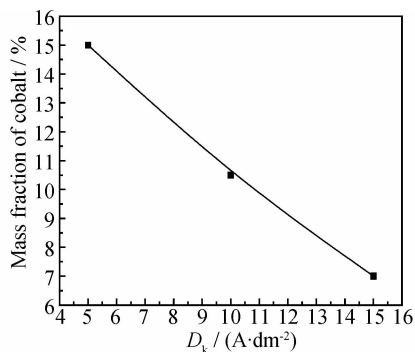


图4 电流密度对铸层钴含量的影响

Fig. 4 The influence of the current density on the cobalt content

线是单纯扩散控制所表征的极化曲线;实线是阴极过程受扩散步骤和电化学步骤混合控制所表征的极化曲线;大多数金属的电沉积都是在受混合控制电流密度下进行的,镍钴合金电沉积的阴极过程也是受混合控制的;当电流密度很小时,式(2)右边第二项可以忽略,传质过程表现为电化学步骤控制为主的极化特征,极化值的大小取决于 i^0 的数值。

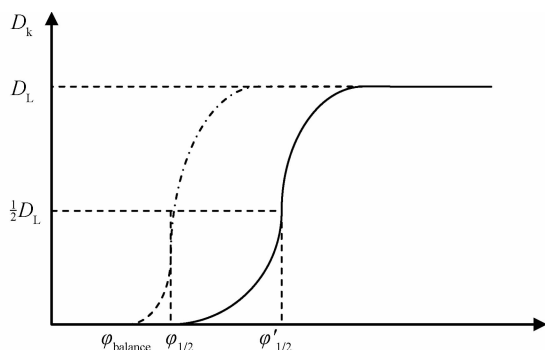

 图5 过程受扩散步骤和电化学步骤混合控制时的极化曲线
(虚线为纯扩散控制的情形, φ 为电位)

 Fig. 5 The polarization curves controlled by diffusion step and electrochemical step
(the dotted line for the case of pure diffusion control, φ is potential)

当电流密度处在 $0.1D_L \sim 0.9D_L$ 范围内时,阴极过程逐渐从电化学步骤控制向以扩散步骤控制为主的混合控制转变;当电流密度大于 $0.9D_L$ 时,阴极过程转变为纯粹的扩散控制^[9]。

在有搅拌的情况下,根据式(3)可以大致算出钴的极限电流密度 $D_L \approx 0.7 \sim 7 \text{ A/dm}^2$ (式中 $K \approx 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$, δ 在搅拌的情况下约为 $10^{-3} \sim 10^{-2} \text{ cm}$);在本实验中电流密度从 5 A/dm^2 变化到 15 A/dm^2 时,由以上分析可知,阴极过程由混合控制转变为纯粹的扩散控制;因此,可以认为钴离子的沉积主要由扩散步骤影响,电流密度已经达到了钴的极限电流密度;电流密度的升高不再影响钴离子的沉积速率,而此时,镍离子的沉积速率会随着电流密度的增加而增加 ($D_L \approx 21 \sim 210 \text{ A/dm}^2$),铸层中镍的相对含量就会增大,那么钴的相对含量就减小了。

2.3 添加剂和电流密度对铸层形貌的影响

图6为添加剂对铸层形貌的影响图。图6(a)为只加入了 TN1 时,铸层的形貌,此时,铸层的表面粗糙,灰暗;图6(b)为加入 TN1 与添加剂 TN2 时,铸层的形貌;图6(c)为同时加入 TN1, TN2, TN3 时,铸层的形貌;由图6可知, TN2 的加入使铸层晶粒更细致,表面更平滑(与图6(a)相比),从宏观上看达到了半光亮的程度。而同时加入 TN2 和 TN3 时晶粒更细致,铸层放大 40000 倍时依然无法看清晶粒,证明晶粒很细小,表面变得更平滑,从宏观上看已经达到了全光亮的程度。添加剂对晶粒大小的影响主要源于它们对阴极极化的影响;图7为添加剂对阴极极化的影响曲线。从图7可以看出, TN2, TN3 的加入都可以增大阴极极化,阴极超电压也会增大,此时,铸层晶核的形成速率会迅速增大,晶粒会变的细致紧密。另外由于添加剂的表面吸附作用抑制了晶粒的尖端放电,所以使得表面更加平滑,当这两种添加剂同时加入时效果特别明显。

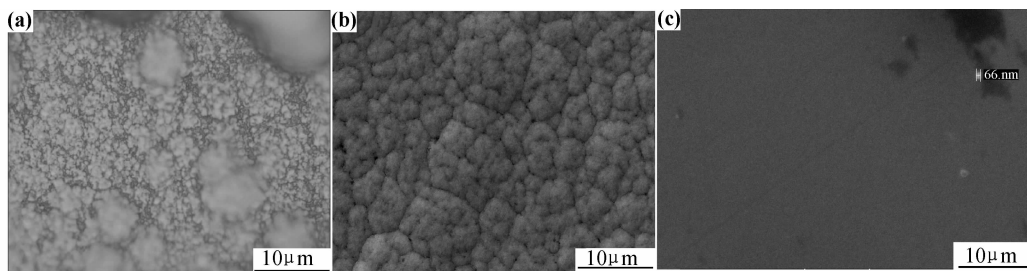


图6 添加剂对铸层形貌的影响

(a) TN1:15g/L; (b) TN1:15g/L, TN2:0.15g/L; (c) TN1:15g/L, TN2:0.15g/L, TN3:0.5g/L

Fig. 6 The influences of the additives on the cast layer's morphology

(a) TN1:15g/L; (b) TN1:15g/L, TN2:0.15g/L; (c) TN1:15g/L, TN2:0.15g/L, TN3:0.5g/L

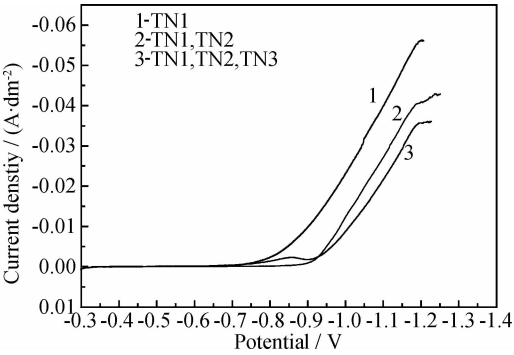


图 7 添加剂对阴极极化曲线的影响
Fig. 7 The influences of the additives on the cathode polarization curve

图 8 为电流密度分别为 5,10,15A/dm² 时铸层的表面形貌图。从图 8 可以看出当电流密度为 5A/dm² 时晶粒较大(6μm 左右);电流密度为 10A/dm² 时晶粒变得更加细小均匀,表面更加平滑。由此可以看出增大电流密度有利于晶粒细化,同时能够使铸层表面更加平滑,这主要由于电流密度的增大使得阴极极化值增大,形核率提高;当电流密度为 15A/dm² 时铸层晶粒变得更加圆滑、细小,棱角变得不明显;这可能是由于电流密度的增大使阴极极化增大的同时也使阴极表面的电荷密度增大,当其达到临界值时,同性离子会相互排斥,使阴极表面电荷重新分布,从而使阴极表面的电荷分布更加均匀,削弱了尖端效应;所以电流密度

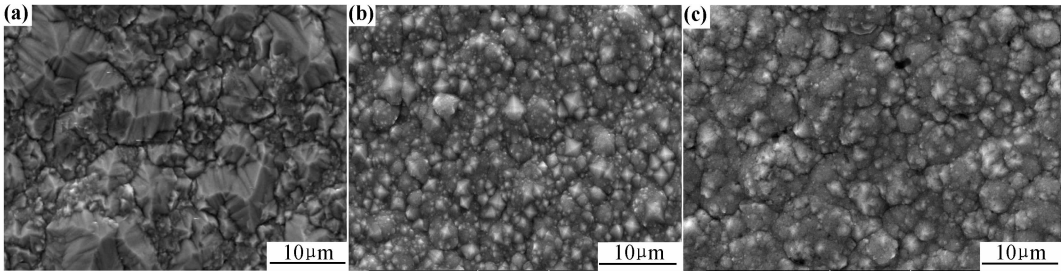


图 8 电流密度对铸层形貌的影响 (a)5A/dm²;(b)10A/dm²;(c)15A/dm²
Fig. 8 The influences of the current density on the cast layer's morphology (a)5A/dm²;(b)10A/dm²;(c)15A/dm²

为 15A/dm² 时晶粒变得更加圆滑。

2.4 铸层 X 射线衍射分析

2.4.1 添加剂对衍射峰的影响

当加入添加剂 TN2 和 TN3 时所得铸层的 X 射线衍射结果如图 9 所示。

由图 9 可以看出 TN2,TN3 的加入使衍射峰得到宽化,各个晶面的峰宽如表 1 所示,从表 1 也可以明显地看到随着 TN2,TN3 的加入衍射峰出现宽化趋势。峰的宽化与铸层晶粒大小有关,晶粒越小,峰宽越大。这与添加剂对铸层表面形貌的影响结果是一致的。

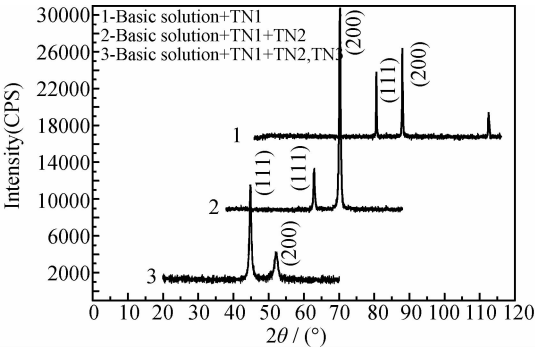


图 9 添加剂对铸层衍射峰的影响
Fig. 9 The influences of the additives on the cast layer's diffraction peak

表 1 不同添加剂时铸层衍射峰的半高宽

Serial number	Technological condition	Half-width				
		(111)	(200)	(220)	(311)	(222)
1	TN1	0.227	0.250	0.418	0.420	0.487
2	TN1+TN2	0.491	0.742	0.420	1.298	1.245
3	TN1+TN2+TN3	0.434	1.232	0.223	1.608	1.076

同时,从图 9 可以看出随着 TN2,TN3 的加入,并未观察到其他相的衍射峰的出现,说明 TN2,TN3 的加入并未使铸层中形成其他相,此时,Co 原子只是以置换固溶的形式进入 Ni 原子的晶格点阵中形成单相

固溶体^[12,13];添加剂 TN2 对衍射峰(111)峰形的影响不大,对衍射峰(200)影响较大。TN2 的加入能够衍射峰(200)的强度明显增强。这表明添加剂 TN2 在阴极表面吸附时,对晶面具有选择性,对晶体的生长方向

有一定影响。添加剂 TN3 的加入对峰形的影响较大,能够使衍射峰(111)的强度显著增强,使衍射峰(200)强度减弱。这表明添加剂 TN3 在阴极表面吸附时,对晶面具有较强的选择性。这可能由于(200)面为高指数面,能量较高,添加剂 TN3 容易在此面吸附,从而抑制了(200)面的生长,削弱了衍射峰(200)。

2.4.2 电流密度对衍射峰的影响

不同电流密度下铸层的 X 射线衍射结果如图 10 所示。表 2 是电流密度对晶面间距的影响。

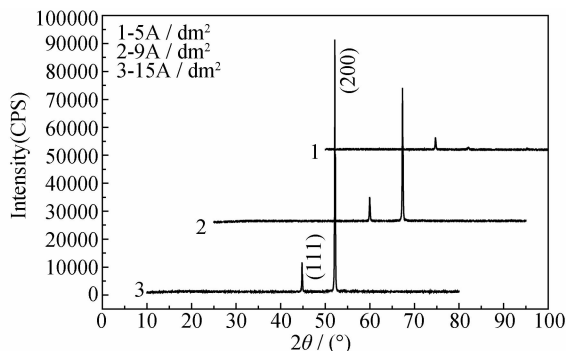


图 10 电流密度对铸层的衍射峰的影响

Fig. 10 The influences of the current density on the cast layer's diffraction peak

表 2 不同电流密度下铸层的晶面间距

Table 2 The influences of the current density on interplanar spacing

$D_k / (\text{A} \cdot \text{dm}^{-2})$	$d_{(111)} / \text{nm}$	$d_{(200)} / \text{nm}$
5	0.20439	0.17691
9	0.20394	0.17653
15	0.20401	0.17654

从图 10 可以看出:随着电流密度的增大,并未观察到其他相的衍射峰的出现,说明电流密度的增大并没有改变铸层中相结构,Co 原子则是以置换固溶的形式进入 Ni 原子的晶格点阵中形成单相固溶体^[13];衍射峰出现宽化的趋势,这表明随着电流密度的增大铸层晶粒越来越细小,这与扫描电镜的结果一致;其晶面间距的变化如表 2 所示。电流密度的变化对晶面间距的影响并不明显,虽然电流密度的增大会使铸层中钴的含量降低,从而会影响晶面间距,但此时 H, N, C 等夹杂物可能会增加,弥补了因钴含量降低而引起的晶面间距的变化,因此电流密度增大对晶面间距影响并不大。从图 10 还可以明显看出两个强峰(111)和(200),并随着电流密度的增加,逐渐增强,但是(200)的强度均比(111)的强度大得多。这表明晶核的生长方向主要沿着[100]方向,部分沿着[111]方向。

3 结论

(1) TN2 的加入能够使铸层产生压应力,抵消原铸层中的张应力,即宏观表现为应力值减小;TN3 能够使铸层产生张应力,随其浓度的增加,铸层应力不断升高;当电流密度小于 6 A/dm^2 时,铸层应力随着电流密度的增加而增加;当电流密度大于 6 A/dm^2 时,铸层应力随着电流密度的增加而减小;因此,添加剂 TN3 需于 TN2 配合使用,当它们的浓度达到两条曲线的交点处(0.07 g/L)时,此时铸层应力达到平衡值零;电铸时应适当控制电流密度的范围,尽量使铸层应力较小。

(2) 添加剂对铸层钴含量影响不明显,呈先增大后减小的趋势;电流密度对铸层钴含量的影响较明显,随着电流密度的增大,呈下降趋势。

(3) TN2, TN3 的加入能够使铸层更平滑、晶粒细致紧密,同时,它们的表面吸附作用抑制了晶粒的尖端放电,使得表面更加平滑,当这两种添加剂同时加入时效果特别明显;添加剂 TN2 对衍射峰(111)的影响不大,对衍射峰(200)影响较大,对晶面具有一定的选择性;添加剂 TN3 对晶面具有较强的选择性,易在(200)面吸附,抑制其生长,此时晶体的生长方向主要为[100],出现较强的衍射峰。随着电流密度的增大,衍射峰出现宽化的趋势;具有两个衍射强峰(111)和(200),并随着电流密度的增加而增强,衍射峰(200)的强度均比衍射峰(111)的强度大得多。晶核的生长方向主要沿着[100]方向,部分沿着[111]方向。

参考文献

- [1] 李松,马立娟. 复合材料模具表面电铸镍钴合金研究[J]. 电镀与涂饰, 2006, 25(10): 1—4.
LI Song, MA Li-juan. Study on electroformed nickel-cobalt alloy on the surface of composite mould [J]. Electroplating & Finishing, 2006, 25(10): 1—4.
- [2] 李学磊,朱增伟,朱荻. 辅助摩擦电铸 Ni-Mn 合金的力学性能[J]. 航空材料学报, 2011, 31(3): 65—70.
LI Xue-lei, ZHU Zeng-wei, ZHU Di. Mechanical properties of Ni-Mn alloy electroformed with abrasion-assisted method[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2011, 31(3): 65—70.
- [3] SRIVASTAVA M, SELVI V E, GRIPS V K W, et al. Corrosion resistance and microstructure of electrodeposited nickel-cobalt alloy coatings [J]. Surface & Coatings Technology, 2006, 201(6): 3051—3060.
- [4] ORIŇÁKOVÁ R, ORIŇÁK A, VERING G, et al. Influence of pH on the electrolytic deposition of Ni-Co films [J]. Thin Solid Films, 2008, 516(10): 3045—3050.
- [5] 张俊,裴和中,张国亮,等. 添加剂及波形对镍钴合金电铸液的分散能力的影响[J]. 材料保护, 2009, 42(9): 30—32.
ZHANG Jun, PEI He-zhong, ZHANG Guo-liang, et al. Affec-

- tion of additive and waveform on the throwing power of Ni-Co alloy electroforming solution [J]. *Materials Protection*, 2009, 42(9): 30—32.
- [6] TURY B, RADNÓCZI G Z, RADNÓCZI G, et al. Microstructure properties of pulse plated Ni-Co alloy [J]. *Surface & Coatings Technology*, 2007, 202(2): 331—335.
- [7] 曾华梁, 吴仲达, 陈钊武, 等. 电镀工艺手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [8] 肖亚庆. 铝加工技术实用手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005.
- [9] EL-SHERIK A M, SHIROKOFF J, ERB U. Stress measurements in nanocrystalline Ni electrodeposit [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2005, 389(1—2): 140—143.
- [10] 黄子勋, 吴纯素. 电镀理论[M]. 北京: 中国农业机械出版社, 1982.
- [11] 王伊卿, 赵文珍, 唐一平, 等. Ni-Co 合金电铸工艺及性能研究[J]. *兵器材料科学与工程*, 2000, 23(3): 39—43.
- WANG Yi-qing, ZHAO Wen-zhen, TANG Yi-ping, et al. Study on electroforming processing and properties of Ni-Co alloy [J]. *Ordinance Material Science and Engineering*, 2000, 23(3): 39—43.
- [12] 张芳, 荆天辅, 乔桂英, 等. 脉冲电沉积钴镍合金层微观结构的研究[J]. *电镀与涂饰*, 2001, 20(6): 1—3.
- *****
- (上接第 4 页)
- [6] 东华. 第三代单晶高温合金[J]. *航空制造工程*, 1995, (12): 9—11.
- DONG H. The third generation single crystal superalloys[J]. *Aviation Engineering & Maintenance*, 1995, (12): 9—11.
- [7] ERICKSON G L. The development of CMSX-10, a third generation SX casting superalloy[A]. *The Second Pacific Rim International conference on Advanced Materials and Processing* [C]. Kyongju, Korea: TMS, 1995. 18—22.
- [8] BURGEL R, PORTELLA P D, PREUHS J. Recrystallization in single crystals of nickel base superalloys[A]. POLLOCK T M, KISSINGER R D, BOWMAN R R, et al. *Superalloy 2000* [C]. Warrendale, PA, USA: TMS, 2000. 229—238.
- [9] CHANG J C, CHOI C, KIM J C, et al. Development of microstructure and mechanical properties of a Ni-base single-crystal superalloy by hot-isostatic pressing[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2003, 12(4): 420—425.
- [10] FRITZEMEIER L G. The influence high thermal gradient casting, hot isostatic pressing and alternate heat treatment on the structure and properties of a single crystal nickel base superalloy [A]. REICHMAN S, DUHL D N, MAURER G, et al. *Superalloys 1988* [C]. Champion, PA: TMS, 1988. 305—314.
- [11] 汤鑫, 刘发信, 李爱兰, 等. 细晶铸造 K403 合金热等静压及热处理工艺研究[J]. *航空材料学报*, 2003, 23(增刊 1): 45—50.
- TANG X, LIU F X, LI A L, et al. Investigation on hot isostatic pressing and heat treating process for fine grain cast K403 alloy[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2003, 23(S1): 45—50.
- [12] 黄荣芳, 于维成, 唐亚俊, 等. 热等静压对铸造高温合金疲劳性能的影响[J]. *机械工程材料*, 1988, (3): 50—53.
- ZHANG Fang, JING Tian-fu, QIAO Gui-ying. Studies on the microstructure of pulse electrodeposited cobalt-nickel alloy deposits [J]. *Electroplating & Finishing*, 2001, 20(6): 1—3.
- [13] 许伟长, 戴品强, 郑耀东. 钴含量对电沉积纳米晶镍钴合金组织与力学性能的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2010, 20(1): 92—99.
- XU Wei-chang, DAI Pin-qiang, ZHENG Yao-dong. Effect of Co content on structures and mechanical properties of electrodeposited nanocrystalline Ni-Co alloys [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2010, 20(1): 92—99.
-
- 收稿日期: 2012-01-09; 修订日期: 2012-12-03
- 作者简介: 裴和中(1963—), 男, 副教授, 研究方向为表面技术与功能膜材料、腐蚀理论与防腐技术, 联系地址: 云南省昆明市昆明理工大学莲华校区材料科学与工程学院材料加工工程系(650093), E-mail: peihezong@vip.qq.com
- 通讯作者: 史庆南(1956—), 男, 教授, 研究方向为材料成形与组织性能控制、材料制备与加工过程模拟, 联系地址: 云南省昆明市昆明理工大学莲华校区材料科学与工程学院材料加工工程系(650093), E-mail: shikust@vip.163.com
-
- HUANG R F, YU W C, TANG Y J, et al. The effect of hot-isostatic pressing on fatigue properties of cast superalloy[J]. *Materials for Mechanical Engineering*, 1998, (3): 50—53.
- [13] ATKINSON H, DAVIES S. Fundamental aspects of hot isostatic pressing: An overview[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2000, 31(12): 2981—3000.
- [14] 郭建亭. 高温合金材料学[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [15] FENG Q, CARROLL L J, POLLOCK T M. Solidification segregation in ruthenium-containing nickel-base superalloys [J]. *Metallurgical and Materials Transactions*, 2006, 37A(6): 1949—1962.
- [16] 陈晶阳, 胡聘聘, 冯强, 等. Ru 对镍基单晶热暴露组织演变及持久性能的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2011, 40(12): 2111—2116.
- CHEN J Y, HU P P, FENG Q, et al. Effects of Ru on microstructural evolution during thermal exposure and stress-rupture property of Ni-based single crystal superalloys[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2011, 40(12): 2111—2116.
-
- 收稿日期: 2013-02-28; 修订日期: 2013-03-25
- 作者简介: 曹腊梅(1966—), 女, 研究员, 工学硕士, 现从事高温结构材料研究, 联系地址: 北京市 81 信箱 1 分箱(100095), E-mail: amy.clm@sohu.com
- 通讯作者: 刘丽君(1988—), 女, 助理工程师, 工学硕士, 现从事高温结构材料研究, 联系地址: 北京市 81 信箱 1 分箱(100095), E-mail: liulijun45@gmail.com