

电磁搅拌对金基合金凝固组织和心部缺陷的影响

张俊凯, 张勤, 厉英, 邓文卓, 闫晨

(东北大学, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 分别采用传统模铸与电磁搅拌工艺制备金基合金, 研究了不同电流参数对金基合金枝晶组织和心部缺陷的影响。结果表明: 电磁搅拌可以明显降低金基合金微观组织的枝晶化程度, 与此同时, 消除了在传统模铸条件下金基合金铸锭心部所普遍出现的中心缩孔和缩松等缺陷。对电磁搅拌作用下, 金基合金凝固组织的细化和铸锭心部缺陷的消除机理进行了探讨。

关键词: 金基合金; 电磁搅拌; 枝晶组织; 细化; 缩孔

中图分类号: TG146.3⁺1; TG111.4

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2017)01-0274-04

随着现代微电子工业和首饰业的迅猛发展, 金基合金的优异性能逐渐引起人们的重视。作为新的功能材料, 其除保持了纯金原有的导电性好、耐腐蚀、抗氧化等性能, 同时还具有更高的再结晶温度和力学性能, 因此被广泛应用于微电子、光电子工业、饰品、牙科和复合材料等领域^[1]。近些年, 随着人们对高品质薄膜材料需求的不断扩大, 如何利用磁控溅射技术, 生产出更多具有优异性能的金基合金薄膜材料, 日益成为材料领域科研工作者的主要工作方向。

靶材是磁控溅射镀膜技术的源材料, 其质量的好坏对薄膜的性能起着决定性的作用^[2]。采用传统模铸工艺制备的金基合金靶材, 由于金与某些合金元素之间比重和熔点相差比较大, 合金热导率高, 凝固速度快等原因, 常伴有凝固组织偏析严重、枝晶组织粗大、缩松缩孔严重、夹杂物多、内应力大等众多问题, 严重影响了金基合金镀膜制品的质量^[3]。而电磁搅拌工艺可以显著细化凝固组织、提高合金力学性能、改善溶质元素偏析程度和铸锭表面质量, 因而将电磁搅拌技术应用于金基合金靶材的制备, 对提高靶材的利用率和镀膜产品的质量具有十分重要的意义。本实验将传统模铸与电磁搅拌工艺制备的金基合金进行比较, 主要研究了电磁搅拌对金基合金微观组织以及心部缺陷的影响。

1 实验

以高纯金 ($\geq 99.99\%$)、高纯铜为原料, 分析纯

($\geq 99.95\%$)的锌粉、铝粉、钴粉、钇粉和铟粒等为合金化元素进行金基合金熔炼, 合金名义成分如表 1 所示。

金基合金的熔炼和铸造过程在自主研发的具有气氛保护功能的金基合金熔炼和铸造一体化设备中进行, 保护气体采用高纯氩气。电磁参数为: 交流磁场, 频率为 50 Hz, 线圈匝数 600, 输入电压在 0~200 V 之间自行调节, 输入电流对应为 0~8 A。

熔炼开始前, 将定量的金和铜装入事先预热过的石墨粘土坩埚中, 并置于设备的熔炼区, 而后向系统通入氩气, 以保证整个系统处于惰性气体保护下。开启高频电磁感应炉, 缓慢升温至 1300 °C, 依次加入各合金元素进行合金熔炼和精炼。合金化后, 将感应炉温度调整为 1450 °C, 待温度稳定后, 送至铸造区域, 启动电磁搅拌装置, 采用变频器调节感应线圈的电流强度分别为 0 (未施加电磁场)、4、6 和 8 A。每次待金基合金完全冷却后取出, 期间始终保持惰性气体环境, 以免熔体和合金元素在熔炼和凝固过程中吸气、氧化。在各个合金铸锭的相同部位进行取样、研磨、抛光和腐蚀, 采用王水作为腐蚀液, 腐蚀时间为 20~30 s, 然后利用金相显微镜研究其微观组织结构。

表 1 金基合金的成分

Table 1 Composition of gold-based alloy ($\omega/\%$)

Au	Cu	Zn	Co	In	Al	Y
60	32.3	3.0	0.5	2.0	1.5	0.7

收稿日期: 2015-12-22

基金项目: 国家科技支撑计划 (2012BAE06B00); 国家自然科学基金 (51274057)

作者简介: 张俊凯, 男, 1986 年生, 博士生, 东北大学材料与冶金学院, 辽宁 沈阳 110819, 电话: 024-83688995, E-mail: junkaizhang@foxmail.com

2 结果与讨论

2.1 电磁搅拌对金基合金微观组织的细化

本实验通过对电磁搅拌器施加多相交流电流产生旋转磁场，从而在熔体中感生感应电流，其 Ohm 定律表达式为：

$$\vec{J} = \sigma(\vec{E} + \vec{v}\vec{B}) \quad (1)$$

式中， \vec{J} 为感应电流， σ 为电导率， \vec{E} 为电场强度， \vec{B} 为磁感应强度， \vec{v} 为熔体运动速度。电磁力是由磁场与在熔体中感生的感应电流相互作用产生的，即：

$$\vec{F}_e = \vec{J} \times \vec{B} \quad (2)$$

该力称为洛伦兹力，是体积力，从而使熔体运动。

图 1 为不同电流强度下金基合金横截面电磁力分布矢量图。由图 1 可以看出，电流强度为 4 A 时试样横截面内熔体所受电磁力分布较为稀疏，即电磁力较弱。而随着电流强度的增大，电磁力明显增强，对熔体的搅拌强度也随之提高。

感应线圈电流强度分别为 0、4、6 和 8 A 的金基合金微观组织如图 2a~2d 所示。其中图 2a 为线圈电流强度为 0 A（未施加电磁搅拌），亦即传统铸造工艺所制备的金基合金试样横截面，从中可以看出，采用传统铸造工艺制备的试样其铸态组织全部是粗大的树枝晶，一次分枝非常发达，并且二次枝晶臂间距较大。晶粒尺寸差异较大，且彼此之间相互“搭桥”现象严重，形成了非常多的晶间缩松孔洞。这是因为金基合金的固溶体在传统凝固条件下结晶时，熔池内温度场、溶质元素分布不均匀，形核核心少，界面前沿存在一个范围较宽的成分过冷区，从而使突出界面的某一部分能较长距离地伸入到液体中，形成非常发达的枝晶主干。同时，在一次枝晶主干两侧也由于溶质浓度的不同存在着成分过冷，于是形成二次晶枝。如果成分过冷区足够大，二次晶枝发展到一定程度后，又会出

现三次晶枝，逐渐形成树枝状的骨架。随着温度的降低，枝与枝间的液体逐渐向分枝上凝固，从而形成一个完整的晶粒。采用传统模铸制备的金基合金，其凝固速度较快，溶质不可能得到充分扩散，因此，凝固后所得到的金基合金中，每个晶粒都存在成分不均匀的现象，溶质元素及低熔点的杂质元素通常富集于分枝间最后凝固的熔体中^[4]。

图 2b~2d 所示为感应线圈电流强度分别为 4、6 和 8 A 的金基合金微观组织金相照片。从中可以看出，由电磁搅拌工艺所制备的金基合金，其枝晶组织较传统铸造方式明显细化，一次枝晶的生长受到抑制，二次枝晶臂间距变短，晶粒尺寸开始变得均匀，并且随着感应线圈电流强度的增加，也就是电磁场强度的增大，这种细化效果变得更加明显。当电流强度达到 8 A 时，凝固组织的枝晶分枝已经变得非常模糊，这种形态的晶粒尺寸分布比较均匀，致密度也较好，可以显著提高铸态组织的强度、塑性和疲劳强度等力学性能。综合前人^[5-9]的研究成果，作者认为，电磁搅拌对金基合金组织的细化作用主要可以归结为以下两个方面。

(1) 熔体内结晶核心增加。在电磁场作用下，熔体受到洛伦兹力的作用，会产生强烈对流，从而使游离的枝晶间发生剧烈的碰撞，造成二次枝晶臂折断，碎块演化成新的结晶核心；其次，树枝晶生长过程中，其枝晶分枝常会因成分偏析形成一些细的缩颈，电磁搅拌会使熔体产生强烈的温度起伏，从而引起分枝在缩颈处熔断，在后续凝固过程中，那些尺寸大于临界晶核的残留部分便会形成新的结晶核心，从而也增加了有效结晶核心的数量。(2) 枝状晶生长得到抑制。枝状晶的生长需要在固液界面前沿存在一个较大的成分过冷区，界面上的突出部分从而能伸入到过冷区内，形成粗大的枝晶组织。而强烈的电磁搅拌使熔体的温度场和浓度场更加均匀，降低了熔体的温度梯度和固

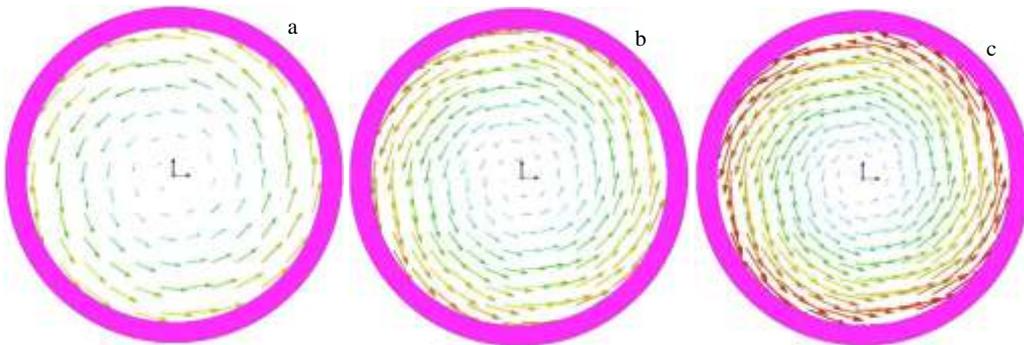


图 1 不同电流强度下金基合金横截面电磁力分布矢量图

Fig.1 Vector distributions of electromagnetic force on the cross-section of gold-based alloy under different current intensities:

(a) 4 A, (b) 6 A, and (c) 8 A

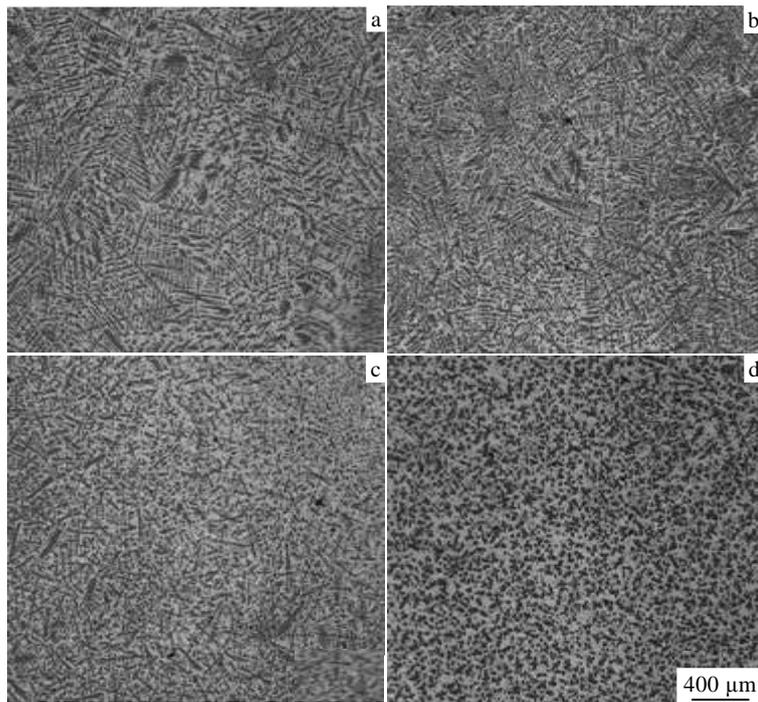


图 2 不同电流强度下金基合金显微组织

Fig.2 Microstructures of gold-based alloy under different current intensities: (a) 0 A, (b) 4 A, (c) 6 A, and (d) 8 A

液界面前沿的成分过冷程度，提高了内部熔体的散热能力，同时又使晶粒析出时的结晶潜热释放过程延长，影响区变小，抑制了枝状晶的生长，使得一次枝晶细密，二次枝晶间距变短，晶粒得到细化。

2.2 电磁搅拌对金基合金坯料心部缺陷的影响

传统模铸条件下，金基合金铸坯经常出现裂纹、中心缩孔和缩松等心部缺陷，如图 3 所示。缩松缩孔的存在，减小了材料有效受力面积，降低了铸件的气密性，甚至是物理化学性能。应力集中现象也常产生于此，显著降低了材料的力学性能，尤其是铸件的延伸率和冲击韧性。形成缩松缩孔的主要原因是合金材料的固态收缩小于熔体的液态收缩和凝固收缩，同时因凝固收缩和液态收缩形成的缩松缩孔无法得到熔体有效的补缩造成的^[10]。沿晶裂纹常发生于应力集中的地方或缩孔的下部，由于其存在于铸件内部，通常需要采用γ射线或超声波探伤技术检测。因其不易被发现，故存在很大的安全隐患，易造成非常严重的安全事故。而采用电磁搅拌制备的金基合金，在其内部枝晶组织得到细化的同时，也大大避免了内部组织缺陷的产生。

电磁场作用条件下金基合金锭内部缺陷减少的原因，可归结为^[11-13]：（1）不可补缩区减小。电磁搅拌作用下，金基合金枝晶组织明显细化，提高了凝固组织的致密度，减少了常规模铸时因粗大枝晶相互搭接而封闭晶间熔体难以补缩的情形，从而避免了锭坯心

部中心缩孔和缩松的形成。电磁搅拌产生的洛伦兹力促使熔体产生强烈的对流，有效地提升了熔体的补缩

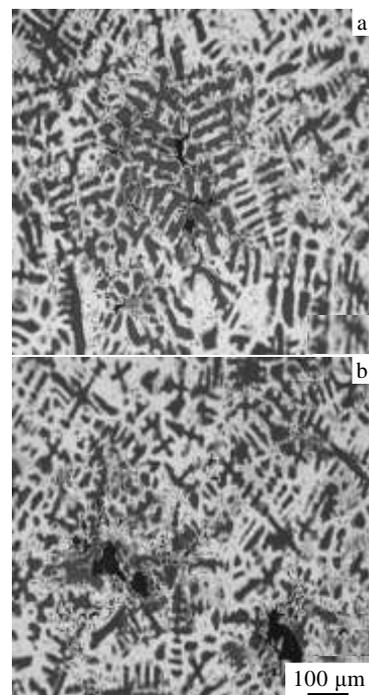


图 3 传统模铸条件下金基合金铸坯的心部缺陷

Fig.3 Central defects of gold-based alloy ingot produced by conventional die casting: (a) intergranular crack and (b) shrinkage cavity and porosity

能力, 显著地降低了铸件缩松缩孔产生的几率。(2) 减小金基合金组织内部的凝固应力。电磁搅拌作用均匀了液穴内部温度场, 减小了在凝固过程中由于铸坯各部位温度相差较大, 收缩量不尽相同而引发的应变和应力, 从而降低了在金基合金的高温脆性区由于晶界液膜强度和塑性低于凝固时的应力和应变而形成沿晶裂纹源的可能性。

3 结 论

1) 采用电磁搅拌工艺制备金基合金, 使合金熔体产生强烈对流, 从而使枝晶间发生剧烈的碰撞, 造成二次枝晶臂折断, 碎块演化成新的结晶核心, 有利于凝固组织的细化。

2) 电磁搅拌迫使金基合金熔体发生剧烈的成分和温度起伏, 更易于二次枝晶臂在缩颈处熔断, 增加了结晶核心的数量, 有利于凝固组织非均匀形核。

3) 洛伦兹力的搅拌作用促进了熔体的流动, 使金基合金熔体的浓度场和温度场更加均匀, 从而有效地抑制了枝状晶的生长, 一次枝晶和二次枝晶臂间距缩短。

4) 电磁搅拌技术可以有效地缩小金基合金凝固时的不可补缩区, 并且减小金基合金组织内部的凝固应力, 因而有利于消除常规模铸时经常出现的金基合金铸锭心部裂纹、缩孔和缩松等铸造缺陷。

参考文献 References

- [1] Ning Yuantao(宁远涛). *Precious Metals*(贵金属)[J], 2007, 28(2): 57
 [2] Gao Ke(高科), Liu Ge(刘革), Chang Zhanhe(常占河). *Gold*

Journal(黄金学报)[J], 2000, 2(3): 35

- [3] Campbell J. *Complete Casting Handbook: Metal Casting Processes, Techniques and Design*[M]. Oxford: Butterworth-Heinemann Press, 2011: 499
 [4] Cui Zhongqi(崔忠圻), Qin Yaochun(覃耀春). *Metallography and Heat Treatment*(金属学与热处理)[M]. Beijing: China Machine Press, 2007: 126
 [5] Zuo Y B, Nagaumi H, Cui J Z. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2008, 197(1-3): 109
 [6] Metan V, Eigenfeld K, Rabiger D. *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2009, 487(1-2): 163
 [7] Mapelli C, Gruttadauria A, Peroni M. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2010, 210(2): 306
 [8] Jin Wenzhong(金文中), Bai Fudong(白富栋), Li Tingju(李廷举) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2008, 37(5): 784
 [9] Zhang Qin(张勤), Cui Jianzhong(崔建中), Lu Guimin(路贵民). *Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2002, 38(9): 956
 [10] Zhao Z H, Cui J Z, Dong J. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2007, 182(1-3): 185
 [11] Zhang Qin(张勤), Zhang Junkai(张俊凯), Li Ying(厉英) *et al. Journal of Wuhan University of Science and Technology*(武汉科技大学学报)[J], 2014, 37(1): 27
 [12] Yao L, Hao H, Gu S W. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*[J], 2010, 20(2): 388
 [13] Jin Wenzhong(金文中), Li Tingju(李廷举), Yin Guomao(殷国茂). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2007, 36(4): 705

Effects of Electromagnetic Stirring on Solidification Microstructure and Central Defects of Gold-based Alloy

Zhang Junkai, Zhang Qin, Li Ying, Deng Wenzhuo, Yan Chen
 (Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: Gold-based alloys were prepared by electromagnetic stirring and conventional die casting separately. The effects of electromagnetic field on as-cast microstructure and central defects of the gold-based alloys were investigated. The results show that the dendritic structure of the gold-based alloy billets prepared by electromagnetic stirring is more uniform and smaller than that by conventional casting. Meanwhile, such defects as shrinkage cavity and porosity that frequently occur in the central region of gold-based alloy ingot produced by conventional die casting are eliminated. Moreover, the mechanism of refinement of the solidification structure and elimination of central defects by electromagnetic stirring were also discussed.

Key words: gold-based alloy; electromagnetic stirring; dendritic structure; refinement; shrinkage cavity

Corresponding author: Li Ying, Ph. D., Professor, School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, P. R. China, Tel: 0086-24-83688995, E-mail: liying@mail.neu.edu.cn