



# 热处理对 $Mg_{81}Ni_8Zn_5Y_6$ 合金中 长周期结构的影响

付丽丽<sup>1,2</sup>, 邱克强<sup>1</sup>, 任英磊<sup>1</sup>, 李荣德<sup>1</sup>

1. 沈阳工业大学 材料科学与工程学院, 沈阳 110870;
2. 辽宁石化职业技术学院 石油化工系, 锦州 121001)

**摘要:** 采用铜模铸造法制备直径为 3 mm 的  $Mg_{81}Ni_8Zn_5Y_6$  非晶复合材料, 并分别在 473 和 773 K 条件下对材料等温热处理 5 h。采用扫描电镜(SEM)、高分辨透射电子显微镜(HRTEM)、X 射线衍射仪(XRD)等方法分别对铸态、热处理态复合材料的组织、相组成和结构进行分析, 研究长周期(LPSO)相的热稳定性及不同长周期(LPSO)结构间的转化过程。结果表明: 铸态  $Mg_{81}Ni_8Zn_5Y_6$  非晶复合材料的 LPSO 相为 14H 结构; 473 K 热处理 5 h 后, LPSO 相转化为 18R 结构; 773 K 热处理 5 h 后, LPSO 相转化为稳定的 6H 结构; 成分和热处理温度均对长周期转化类型有影响。

**关键词:**  $MgNiZnY$  合金; 非晶复合材料; 热处理; 长周期结构; 热稳定性

**中图分类号:** TG139.8

**文献标志码:** A

镁合金具有密度低、比强度高、易回收利用等优点, 在航空航天、汽车、电子等领域得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>。但是与钢、铝合金等一般工程材料相比, 晶态镁合金的强度相对较低, 而非晶态镁合金的强度是一般晶态镁合金的 2~3 倍, 比强度也成倍提高<sup>[2-5]</sup>, 因此作为一种轻质、高比强度、绿色的结构材料<sup>[6]</sup>, 镁基非晶合金的研究得到了较大的进展, 所制备的样品直径尺寸已经达到了厘米量级<sup>[7]</sup>。但是镁基非晶合金的塑性变形能力较差, 限制了其应用。为了改善这一缺点, 人们进行了许多研究, 如采用引入韧性金属作为强化相<sup>[8]</sup>、内生法制备非晶合金复合材料等方法提高镁基非晶合金的韧性。其中, 利用内生法制备非晶复合材料发展较快, 在  $Mg-Cu-Zn-Y$ <sup>[9-11]</sup>、 $Mg-Cu-Ni-Y$ <sup>[12]</sup>、 $Mg-Ni-Zn-Y$ <sup>[13]</sup>、 $Mg-Zn-Ca$ <sup>[14-16]</sup>、 $Mg-Cu-Y$ <sup>[17-18]</sup>等合金体系中都发现了具有较高塑性的镁基非晶复合材料, 而 HUI 等<sup>[10]</sup>和 QIU 等<sup>[13]</sup>发现的具有长周期(Long-period stacking ordered, LPSO)结构的  $Mg-Cu/Ni-Zn-Y$  非晶复合材料同时具有更高的塑性和强度。

对  $Mg$  合金中长周期结构的研究主要集中在  $Mg-TM-RE$ ( $TM=Cu, Ni, Zn, RE=Y, Gd, Er$ )等合金体系<sup>[19-24]</sup>, 共发现了 5 种类型的 LPSO 结构, 即

6H(ABCBCB')、10H(ABACBCBCAC)、14H(ABAB-ABACBCBCBC)、18R(ABACBCBCBACACACBAB)和 24R(ABABABABCACACACABCBCBCBC)。LPSO 结构既可以出现在镁基体中, 也可以出现在第二相中。LPSO 相不仅是堆垛有序结构, 还是化学有序结构。在凝固过程中及热处理工艺中均可以形成具有 LPSO 结构的第二相及有序固溶体, 在适当条件下, LPSO 之间可以相互转变。

目前, 对镁基非晶复合材料中 LPSO 相的研究相对较少<sup>[25-26]</sup>, 探索 LPSO 结构的形成机制、不同 LPSO 结构间的转变机制以及热处理对 LPSO 结构的影响显得尤为重要。本文作者通过固定热处理时间, 改变热处理温度, 研究热处理温度对  $Mg_{81}Ni_8Zn_5Y_6$  合金中 LPSO 结构类型及 LPSO 结构之间转变的影响。

## 1 实验

采用高纯度(99.9%, 质量分数)的金属  $Mg$ 、 $Ni$ 、 $Zn$ 、 $Y$  为原料, 按照名义成分  $Mg_{81}Ni_8Zn_5Y_6$ (摩尔分数, %)配制合金。首先在 Ti 吸收、高纯氩气保护下, 采用非自耗真空电弧炉制备  $Ni-Y$  中间合金; 然后将中间

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2011CB606301)

收稿日期: 2015-09-28; 修订日期: 2016-02-24

通信作者: 邱克强, 教授, 博士; 电话: 024-25499927; 传真: 024-25499928; E-mail: kqqu@163.com

合金与 Mg、Zn 放到 BN 坩锅内, 在高纯氩气保护下, 采用感应熔炼炉、铜模喷铸的方法制备直径为 3 mm, 高度约 60 mm 的样品。在电阻炉中, 分别在 473 K 和 773 K 条件下对样品等温处理 5 h 后再进行水淬处理。

采用 X 射线衍射(Rigaku D/max 2400 型, Cu  $K_{\alpha}$  辐射,  $\lambda=1.5405$  nm, 扫描范围为  $20^{\circ}\sim 80^{\circ}$ , 功率为 12 kW)、扫描电镜(S-3400 型, 试样表面抛光)和高分辨透射电子显微镜(Tecnai G20 型, 工作电压为 150 kV)对合金的成分、组织和相组成等进行分析, 同时采用选区电子衍射(Selected area electron diffraction, SAED)分析相的结构。其中, TEM 试样的制备方法如下: 先用线切割将样品切成厚度约为 1 mm 的薄片, 然后用手工方法磨制成厚度约为  $30\sim 40$   $\mu\text{m}$  的薄片, 再经离子减薄仪进行减薄, 最终制成符合要求的薄膜样品。

## 2 结果与讨论

### 2.1 合金相组成的变化

图 1 所示为  $Mg_{81}Ni_8Zn_5Y_6$  试样的 XRD 谱。而图 1 中的内嵌图为所制备的铸态样品。由图 1 可知, 铸态样品(见图 1 中曲线(a))和 473 K 热处理 5 h 后的样品(见图 1 中曲线(b)), 其 XRD 谱与基线相比, 在  $2\theta$  为  $30^{\circ}\sim 45^{\circ}$  范围内, 均呈现出非晶所特有的漫散射峰, 同时在漫散射峰上叠加了尖锐的晶态相衍射峰, 这说明合金是由非晶基体和分布在非晶基体上的晶态相所组成的复合材料。而 773 K 热处理 5 h 的样品基本由晶态相组成(见图 1 中曲线(c))。从图 1 可以看到, 3 条曲线上出现晶相衍射峰的位置及峰的强度都有所不同,

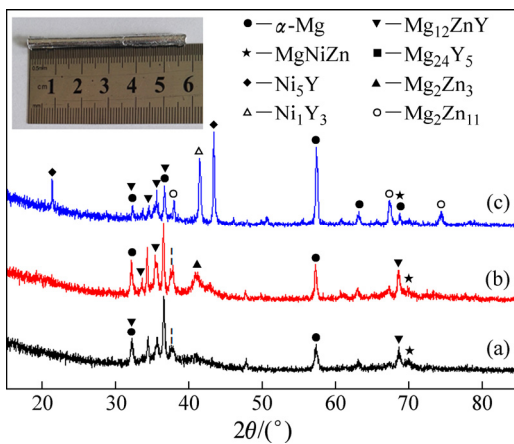


图 1  $Mg_{81}Ni_8Zn_5Y_6$  合金试样的 XRD 谱

Fig. 1 XRD patterns of  $Mg_{81}Ni_8Zn_5Y_6$  alloy: (a) As-cast; (b) Heat treatment at 473 K for 5 h; (c) Heat treatment at 773 K for 5 h

这说明合金中的晶态相种类和相对含量都发生了变化, 即在不同的热处理温度下有新相形成。表 1 所列为各试样的相组成。

表 1 在不同条件下处理后样品的相组成

Table 1 Phase formation of samples treated under different conditions

Sample state	Phase constituent of sample
As-cast	$\alpha$ -Mg, MgNiZn, $Mg_{24}Y_5$ , $Mg_{12}ZnY$
Heat treatment at 473 K	$\alpha$ -Mg, MgNiZn, $Mg_{24}Y_5$ , $Mg_{12}ZnY$ , $Mg_2Zn_3$
Heat treatment at 773 K	$\alpha$ -Mg, MgNiZn, $Mg_{12}ZnY$ , $Mg_2Zn_{11}$ , $Ni_5Y$ , $Ni_2Y_3$

结合图 1 及表 1 可以看到: 铸态试样 XRD 曲线中非晶相的漫散射峰较明显, 合金中相的种类较少; 经过 473 K 热处理 5 h 的试样中存在 5 种相, 分别为  $\alpha$ -Mg、MgNiZn、 $Mg_{24}Y_5$ 、 $Mg_{12}ZnY$  和  $Mg_2Zn_3$ , 其中  $Mg_2Zn_3$  相为新生相; 经过 773 K 热处理 5 h 试样中的  $Mg_{24}Y_5$  及  $Mg_2Zn_3$  消失, 同时生成  $Mg_2Zn_{11}$ 、 $Ni_5Y$  和  $Ni_2Y_3$  相, 此时, 非晶相的漫散射峰基本消失, 这说明非晶相在热处理过程中逐渐分解形成不同结构的晶态相。

### 2.2 合金的显微组织变化

图 2 所示分别为不同状态下  $Mg_{81}Ni_8Zn_5Y_6$  合金的 SEM 像。由图 2(a)可以看到, 在灰色基体上均匀地分布着长约  $10$   $\mu\text{m}$ 、宽小于  $2$   $\mu\text{m}$  的黑色针状 LPSO 相。其形成可归为如下 3 个方面: 1) 快速凝固时, 具有 LPSO 结构  $\alpha$ -Mg 固溶体作为领先相首先析出, 该相析出过程中, 伴随着 Mg 的大量消耗, 使剩余液体中 Ni、Zn、Y 等元素富集, 从而使析出的  $\alpha$ -Mg 相周围的成分接近于共晶成分, 为非晶形成提供了成分条件。根据相竞争机制<sup>[27]</sup>可知, 在快速凝固时, 非晶相比共晶相优先生成, 于是在  $\alpha$ -Mg 相周围形成非晶相基体, 并消耗掉了大量的 Ni、Zn、Y 等元素, 这样就限制 LPSO 相的生长。2) 新相形成时表面能发生变化, 不同形状的晶体表面能由小到大依次为球状、针状、盘状, 如果新相想要继续长大, 则需降低界面能, 而要降低界面能势必会引起比容应变能增大, 所以只有界面能降低量大于比容应变能升高量才能使新相长大, 比容应变能由小到大依次为盘状、针状、球状<sup>[28]</sup>, 可以看出球状和盘状相都不能满足界面能降低量大于比容应变能升高量的要求, 从而导致长周期相呈针状。3) LPSO 结构的影响, 已有研究<sup>[20, 23, 29]</sup>表明, 固溶原

子首先分布在 LPSO 相两端的层错层, 在此处形核, 然后向层错内部延伸, LPSO 优先沿密排面堆垛方向生长, 在层错层方向和向层错层内延伸方向上, 各向异性, 所以导致长周期相为针状。由图 2(b)可以看出, 针状相的面积减小, 在灰色的基体上, 析出白色点状。由图 2(c)可以看出, 非晶相消失, 针状相减少, 生成了黑色的  $\alpha$ -Mg 基体和白色的共晶组织。

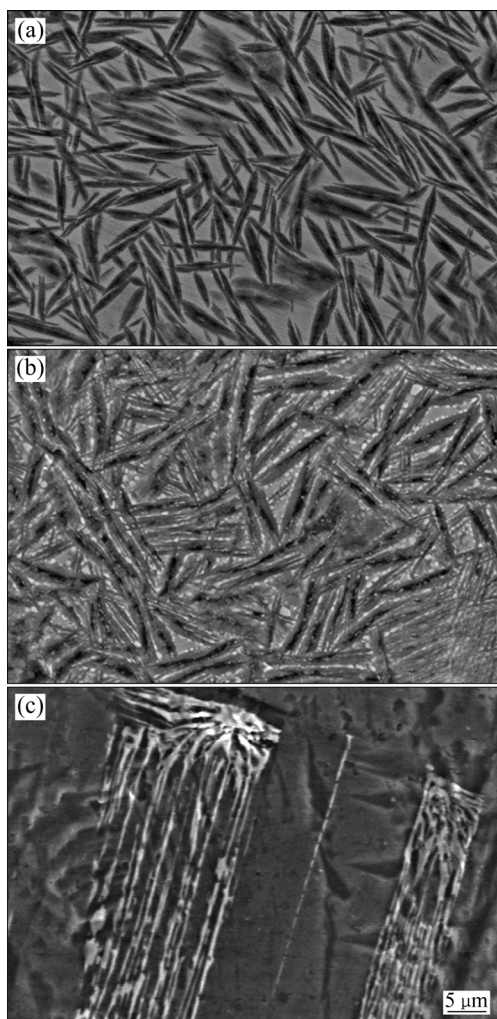


图 2 不同状态下  $Mg_{81}Ni_8Zn_5Y_6$  合金的显微组织

**Fig. 2** Microstructures of  $Mg_{81}Ni_8Zn_5Y_6$  alloy under different conditions: (a) As-cast; (b) Heat treatment at 473 K for 5 h; (c) Heat treatment at 773 K for 5 h

### 2.3 LPSO 结构变化

图 3、4 和 5 所示分别为铸态、473 K 热处理 5 h、773 K 热处理 5 h 试样的 TEM 像, 其中, 图 3(a)、4(a)、5(a)所示分别为合金低倍组织照片; 图 3(b)、4(b)、5(b)所示分别为对应的选区电子衍射谱; 图 3(c)所示分别为合金的 HRTEM 像。从图 3(b)、4(b)、5(b)可以看出, 3 个试样中都存在不同于 2H 结构 Mg 相的衍射斑点,

2H 结构的 Mg 相除了由于二次衍射导致的 0001 衍射斑点外,  $C^*$  方向没有其他的弱斑点出现。而在图 3(b)中可以看到, 在沿倒易  $C^*$  轴方向, 与镁基体 0002 反射对应的强衍射斑点到透射斑点之间存在 13 个附加衍射斑点, 将上述两个斑点间距 14 等分, 表明在铸态  $Mg_{81}Ni_8Zn_5Y_6$  合金中, LPSO 结构为 14H; 同时, 图 3(c)标出 14H 型 LPSO 结构堆垛序列。同样, 从图 4(b)可以看出, 强衍射斑点到透射斑点之间存在 17 个附加衍射斑点, 将上述两个斑点间距 18 等分, 表明经过 473 K 热处理 5 h 的合金中 LPSO 结构主要为 18R。从图 5(b)可以看出, 经过 773 K 热处理 5 h 的合金中 LPSO 结构主要为 6H。

由图 3(b)、4(b)、5(b)可以看出, 随着热处理温度的升高, 合金中的长周期结构发生了明显的变化, 这说明热处理对长周期结构的转变有着比较明显的影响。SHAO 等<sup>[26]</sup>在对  $Mg_{83}Ni_6Zn_5Y_6$  的研究中发现, LPSO 结构类型与热处理温度有关。在铸态、473 K 热

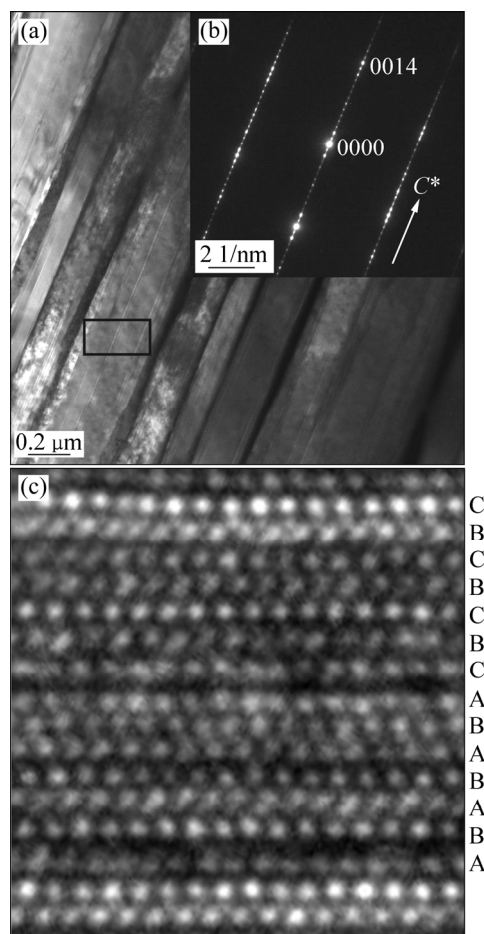


图 3 铸态  $Mg_{81}Ni_8Zn_5Y_6$  合金的 TEM 像

**Fig. 3** TEM images of as-cast  $Mg_{81}Ni_8Zn_5Y_6$  alloy: (a) TEM image; (b) SAED image recorded from local region; (c) HRTEM image

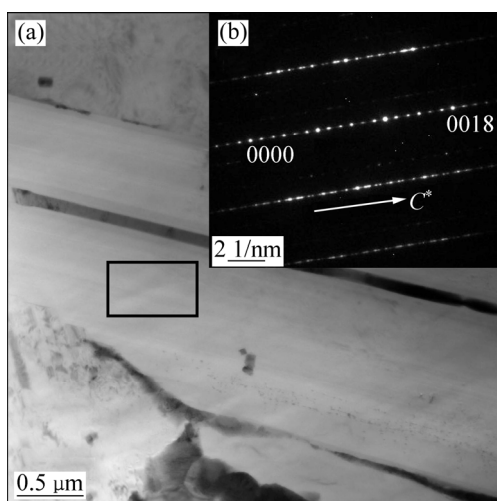


图 4 473 K 热处理  $Mg_{81}Ni_8Zn_5Y_6$  的 TEM 像

Fig. 4 TEM images of  $Mg_{81}Ni_8Zn_5Y_6$  annealed at 473 K for 5 h: (a) TEM image; (b) SAED image recorded from local region

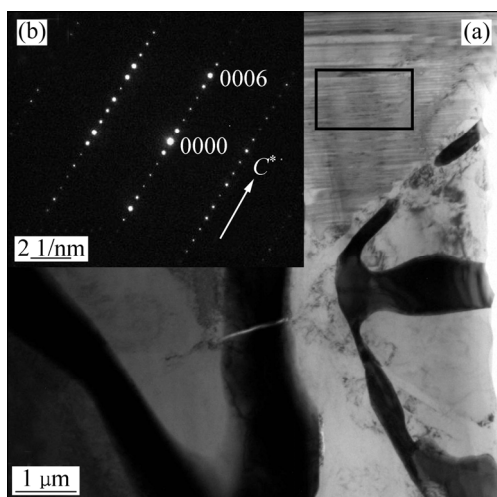


图 5 773 K 热处理  $Mg_{81}Ni_8Zn_5Y_6$  的 TEM 像

Fig. 5 TEM image of  $Mg_{81}Ni_8Zn_5Y_6$  annealed at 773 K for 5 h: (a) TEM image; (b) SAED image recorded from local region

处理 5 h、573 K 热处理 5 h, LPSO 结构以 14H 为主; 在 673 K 热处理 5 h、773 K 热处理 5 h, LPSO 以 18R 为主, 这与本研究中观察到的 LPSO 结构(14H、18R、6H)不同, 说明合金元素含量及热处理温度均可能影响 LPSO 的结构。

随着温度升高, Ni、Zn、Y 在 Mg 中的固溶度增加, 即 Ni、Zn、Y 原子由非晶基体向  $\alpha$ -Mg 中扩散, 在某些区域满足化学成分条件和结构条件时, 在晶粒内开始形成良好的片层状 LPSO 相。随着温度的升高, 进入  $\alpha$ -Mg 中的 Ni、Zn、Y 原子增多, 增大的固溶应力导致 18R-6H 结构的转变, 周期层数降低, LPSO 能够容纳更多的 Ni、Zn、Y 原子, 来抵消增大的固溶应

力。但是, 热处理温度不同, 长周期结构转变的方式也不同, 在 473 K 退火时, 发生的是 14H 向 18R 结构的转变; 在 773 K 热处理时, 发生的是 14H-18R-6H 结构的转变。根据 Arrhenius 方程可以知道, 温度是影响扩散速率的最主要因素, 温度越高, 原子的热激活能量越大, 扩散能力越强。在 473 K 退火时, 由于温度较低, Ni、Zn、Y 原子扩散能力弱, 14H 类型 LPSO 在向基体生长过程中, 两种原子只能沿着镁的最低能量面  $\{0001\}$  向基体扩散, 合金中 14H 类型的 LPSO 贯穿整个晶粒后, 后续沿  $\{0001\}$  面迁移而至的 Zn、Y 原子导致 14H-18R 的转变; 在 773 K 退火时, Ni、Zn、Y 原子的扩散迁移能力增强, 非晶基体的晶化导致镁对 Ni、Zn、Y 原子的束缚力下降, 两种原子可以沿着  $C^*$  轴扩散, 从而形成 14H-6H 的结构转变。由此可以看出, 由于在退火过程中 Ni、Zn 和 Y 在 Mg 中的固溶度降低, 导致 Ni、Zn 和 Y 原子在合金中发生重新排列, 原子重排后还是以固溶形式存在, 结合表 1 中相组成分析, 相的种类发生了变化(形成新的相), 所以长周期的结构演变过程中可能伴有成分的变化, 并且产生了更加稳定的 6H 结构。

### 3 结论

1) 铸态  $Mg_{81}Ni_8Zn_5Y_6$  合金主要由非晶基体和针状的长周期相组成, 随着热处理温度的升高, 合金中的相组成和结构均发生了显著的变化, 经 773 K 热处理 5 h 后的合金中组织形貌演变为  $\alpha$ -Mg 基体和黑白相间的共晶组织。

2) 铸态  $Mg_{81}Ni_8Zn_5Y_6$  非晶复合材料的 LPSO 相为 14H 结构; 473 K 热处理 5 h 后, 试样 LPSO 相为 18R 结构; 773 K 热处理 5 h 后, 试样 LPSO 相为 6H 结构。

3) 合金成分和热处理温度均对 LPSO 的结构和稳定性产生影响, 对于  $Mg_{81}Ni_8Zn_5Y_6$  合金, 可获得稳定性最佳耐高温的 6H 长周期结构相。

### REFERENCES

- [1] 毕广利, 李元东, 黄晓峰, 陈体军, 马颖, 郝远. Zn 含量对铸态 Mg-Dy 合金显微组织和力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2015, 25(4): 875-882.  
BI Guang-li, LI Yuan-dong, HUANG Xiao-feng, CHEN Ti-jun, MA Ying, HAO Yuan. Effects of Zn addition on microstructure and mechanical properties of as-cast Mg-Dy alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2015, 25(4): 875-882.

- [2] 寇生中, 李娜, 郑宝超, 黄文军. 金属基非晶材料的研究进展[J]. 金属功能材料, 2011, 18(1): 71-75.  
KOU Sheng-zhong, LI Na, ZHENG Bao-chao, HUANG Wen-jun. Development of metal-based amorphous alloy[J]. Metallic Functional Materials, 2011, 18(1): 71-75.
- [3] 李林, 于朋, 姚建忠. 镁基非晶合金的研究进展[J]. 铸造工程, 2011(5): 21-27.  
LI Lin, YU Peng, YAO Jian-zhong. Research and development of Mg-based amorphous alloys[J]. Foundry Engineering, 2011(5): 21-27.
- [4] 李林, 寇生中, 高凯雄, 刘广桥, 尚沙沙. Mg基非晶合金的形成能力和力学性能分析[J]. 铸造工程, 2011(6): 21-23.  
LI Lin, KOU Sheng-zhong, GAO Kai-xiong, LIU Guang-qiao, SHANG Sha-sha. Formation ability and mechanical properties of Mg-based amorphous alloys[J]. Foundry Engineering, 2011(6): 21-23.
- [5] 李双寿, 彭浩, 黄天佑. Mg-Ni-Gd-Ag非晶合金的制备及性能[J]. 特种铸造及有色合金, 2012, 32(5): 393-396.  
LI Shuang-shou, PENG Hao, HUANG Tian-you. Preparation and mechanical properties of Mg-Ni-Gd-Ag amorphous alloy[J]. Special Casting and Nonferrous Alloys, 2012, 32(5): 393-396.
- [6] 宁向梅, 黄金亮, 贾淑果, 殷鏢, 张兴渊. Al对Mg-Cu-Y合金非晶形成能力及热稳定性的影响[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(7): 1805-1811.  
NING Xiang-mei, HUANG Jin-liang, JIA Shu-guo, YIN Biao, ZHANG Xing-yuan. Effect of Al on glass forming ability and thermal stability of Mg-Cu-Y alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(7): 1805-1811.
- [7] MA H, SHI L L, XU J, LI Y, MA E. Discovering inch-diameter metallic glasses in three-dimensional composition space[J]. Applied Physics Letters, 2005, 87(18): 181915-1-181915-3.
- [8] KINAKA M, KATO H, HASEGAWA M, INOUE A. High specific strength Mg-based bulk metallic glass matrix composite highly ductilized by Ti dispersoid[J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 494(1): 299-303.
- [9] 惠希东, 董伟, 王美玲, 刘雄军, 于家伶, 陈国良. 超常塑性 Mg<sub>77</sub>Cu<sub>12</sub>Zn<sub>5</sub>Y<sub>6</sub>块体金属玻璃基内生复合材料[J]. 科学通报, 2006, 51(2): 224-229.  
HUI Xi-dong, DONG Wei, WANG Mei-ling, LIU Xiong-jun, YU Jia-ling, CHEN Guo-liang. In-situ formation of Mg<sub>77</sub>Cu<sub>12</sub>Zn<sub>5</sub>Y<sub>6</sub> bulk metallic glass matrix composite with super-high plasticity[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(2): 224-229.
- [10] HUI X, DONG W, CHEN G L, YAO K F. Formation, microstructure and properties of long-period order structure reinforced Mg-based bulk metallic glass composites[J]. Acta Materialia, 2007, 55(3): 907-920.
- [11] LI Z G, HUI X, ZHANG C M, CHEN G L. Formation of Mg-Cu-Zn-Y bulk metallic glasses with compressive strength over gigapascal[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2008, 454(1/2): 168-173.
- [12] MA H, SHI L L, XU J. Chill-cast in situ composites in the pseudo-ternary Mg-(Cu,Ni)-Y glass-forming system: Microstructure and compressive properties[J]. Journal of Materials Research, 2007, 22(2): 314-325.
- [13] QIU K Q, HU N N, ZHANG H B, JIANG W H, REN Y L, LIAW P K. Mechanical properties and fracture mechanism of as-cast Mg<sub>77</sub>TM<sub>12</sub>Zn<sub>5</sub>Y<sub>6</sub> (TM=Cu, Ni) bulk amorphous matrix composites[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 478(1): 419-422.
- [14] 邱克强, 杨君宝, 尤俊华, 任英磊. Mg-Zn-Ca合金的非晶形成能力及力学性能[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(8): 1828-1833.  
QIU Ke-qiang, YANG Jun-bao, YOU Jun-hua, REN Ying-lei. Glass-forming ability and mechanical properties for Mg-Zn-Ca alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(8): 1828-1833.
- [15] 寇生中, 李林, 李春燕, 赵燕春, 高凯雄, 于朋. MgZnCa合金的组织结构和力学性能分析[J]. 兰州理工大学学报, 2012, 38(3): 5-8.  
KOU Sheng-zhong, LI Lin, LI Chun-yan, ZHAO Yan-chun, GAO Kai-xiong, YU Peng. Analysis of microstructures and mechanical properties of Mg-Zn-Ca alloys[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2012, 38(3): 5-8.
- [16] WANG Jing-feng, HUANG Song, GUO Sheng-feng, WEI Yi-yun, PAN Fu-sheng. Effects of cooling rate on microstructure, mechanical and corrosion properties of Mg-Zn-Ca alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(7): 1930-1935.
- [17] 邵阳, 陈刚, 赵玉涛, 张振亚, 侯文胜. 原位CuYSi颗粒增强块体镁基非晶合金复合材料的研究[J]. 功能材料, 2012, 43(8): 1012-1015.  
SHAO Yang, CHEN Gang, ZHAO Yu-tao, ZHANG Zhen-ya, HOU Wen-sheng. Study on in situ CuYSi particle reinforced bulk Mg-based amorphous alloy matrix composites[J]. Journal of Functional Materials, 2012, 43(8): 1012-1015.
- [18] QIU Ke-qiang, WANG Lin, REN Ying-lei, LI Rong-de. Effects of Ti and Be addition on microstructure and mechanical properties of Mg<sub>58.5</sub>Cu<sub>30.5</sub>Y<sub>11</sub> bulk metallic glass[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(2): 477-482.
- [19] 张松, 袁广银, 卢晨, 丁文江. 长周期结构增强镁合金的研究进展[J]. 材料导报, 2008, 22(2): 61-63.  
ZHANG Song, YUAN Guang-yin, LU Chen, DING Wen-jiang. Research progress in Mg-based alloys reinforced by long-period ordered structure[J]. Materials Review, 2008, 22(2): 61-63.
- [20] TANG Ping-ying, WU Meng-meng, TANG Bi-yu, WANG Ji-wei, PENG Li-ming, DING Wen-jiang. Microstructure of 18R-type long period ordered structure phase in Mg<sub>97</sub>Y<sub>2</sub>Zn<sub>1</sub> alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(4): 801-806.
- [21] 刘欢, 薛烽, 白晶. 长周期堆垛有序结构强化Mg-Zn-Y合金的组织与性能[J]. 东南大学学报(自然科学版),

- 2012, 42(3): 478–482.
- LIU Huan, XUE Feng, BAI Jing. Microstructure and properties of Mg-Zn-Y alloys with long period stacking ordered structure[J]. Journal of Southeast University (Natural Science A Edition), 2012, 42(3): 478–482.
- [22] LIU Huan, XUE Feng, BAI Jing, ZHOU Jian, SUN Yang-shan. Microstructure and mechanical properties of  $Mg_{94}Zn_2Y_4$  extruded alloy with long-period stacking ordered structure[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(12): 3598–3603.
- [23] 刘欢, 薛烽, 白晶, 周健, 孙扬善. 含长周期结构  $Mg-(2,3,4)Y-Zn$  合金的显微组织和力学性能[J]. 金属学报, 2013, 49(2): 236–242.
- LIU Huan, XUE Feng, BAI Jing, ZHOU Jian, SUN Yang-shan. Microstructures and mechanical properties of  $Mg-(2,3,4)Y-Zn$  alloys with long period stacking ordered structure[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2013, 49(2): 236–242.
- [24] 刘欢, 薛烽, 白晶, 周健, 孙扬善. 高温退火对铸态和挤压态  $Mg_{97}Y_2Zn_1$  合金中长周期堆垛有序结构形态的影响[J]. 金属学报, 2013, 49(10): 1255–1263.
- LIU Huan, XUE Feng, BAI Jing, ZHOU Jian, SUN Yang-shan. Effects of high temperature annealing on morphology of long period stacking ordered structures in as-cast and as-extruded  $Mg_{97}Y_2Zn_1$  alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2013, 49(10): 1255–1263.
- [25] 任英磊, 吴妍惠, 孙晶, 邱克强, 张涛. 镁基非晶合金复合材料的长周期结构形成规律[J]. 沈阳工业大学学报, 2010, 32(4): 370–374, 399.
- REN Ying-lei, WU Yan-hui, SUN Jing, QIU Ke-qiang, ZHANG Tao. Formation of long-period order structure in Mg-based amorphous matrix composite[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2010, 32(4): 370–374, 399.
- [26] SHAO X H, YANG Z Q, YOU J H, QIU K Q, MA X L. Microstructure and microhardness evolution of a  $Mg_{83}Ni_6Zn_5Y_6$  alloy upon annealing[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2011, 509(26): 7221–7228.
- [27] TAN H, LI Y. Parameters governing glass formation: A view from phase selection[J]. Materials Science and Engineering A, 2007, 449/451: 63–65.
- [28] 康煜平. 金属固态相变及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 1–12.
- KANG Yu-ping. Solid phase transition of metal and applications[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007: 1–12.
- [29] 蒋毅, 唐璧玉. 溶质偏析对 Mg-Y-Zn 合金层错能的影响[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2011, 36(6): 887–891.
- JIANG Yi, TANG Bi-yu. Effect of solute segregation on the stacking fault energy in Mg-Y-Zn alloys[J]. Journal of Guangxi University (Natural Science Edition), 2011, 36(6): 887–891.

## Effect of heat treatment on long-period stacking ordered structure of $Mg_{81}Ni_8Zn_5Y_6$ alloy

FU Li-li<sup>1,2</sup>, QIU Ke-qiang<sup>1</sup>, REN Ying-lei<sup>1</sup>, LI Rong-de<sup>1</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;

2. Petrol-Chemical Department, Liaoning Petrol-Chemical Vocational and Technology College, Jinzhou 121001, China)

**Abstract:**  $Mg_{81}Ni_8Zn_5Y_6$  amorphous matrix composites with 3 mm in diameter were fabricated by conventional Cu-mold casting method and the resultant samples were heat-treated at 473 and 773 K for 5 h, respectively. The microstructure, phase constituent and structure of the as-cast and the annealed samples were analyzed by scanning electron microscopy (SEM), high-resolution transmission electron microscopy (HRTEM) and X-ray diffractometry (XRD). The thermal stability and the transformation process of different long-period stacking ordered (LPSO) structure were investigated. The results show that the LPSO structure in the as-cast sample, the (473 K, 5 h)-annealed sample and the (773 K, 5 h)-annealed sample are 14H, 18R and 6H, respectively. Furthermore, the LPSO structure formation is influenced by both the composition of the alloy and the temperature of heat treatment employed.

**Key words:** MgNiZnY alloy; amorphous matrix composites; heat treatment; long-period stacking ordered structure; thermal stability

**Foundation item:** Project(2011CB606301) supported by the National Basic Research Program of China

**Received date:** 2015-09-28; **Accepted date:** 2016-02-24

**Corresponding author:** QIU Ke-qiang; Tel: +86-24-25499927; Fax: +86-24-25499928; E-mail: kqiu@163.com

(编辑 龙怀中)