

文章编号: 1004 - 0609(2003) 01 - 0015 - 06

# AZ91 镁铝合金中 HCP/BCC 相界面结构<sup>①</sup>

肖晓玲<sup>1</sup>, 罗承萍<sup>1</sup>, 刘江文<sup>1</sup>, 吴东晓<sup>1</sup>, 聂建峰<sup>2</sup>, Barry C Muddle<sup>2</sup>

(1. 华南理工大学 机械工程学院, 广州 510641;

2. Department of Materials Engineering, Monash University, Clayton, Victoria 3168, Australia)

**摘 要:** 采用常规和高分辨电镜研究了时效 AZ91 镁铝合金中 2 种形态  $\gamma$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> 析出相的 HCP/BCC 相界面结构。发现第一类析出相的惯习面 (0002)<sub>α</sub> // {330}<sub>γ</sub> 以及与其对接的另外 2 组主要晶面的面间错配度都很小 (4% 和 2%), 因此界面能较小; 而第 2 类析出相的惯习面 (0110)<sub>α</sub> // ( $\bar{3}$ 30)<sub>γ</sub> 以及与其对接的另一组主要晶面的面间错配度都较大 (11% 和 15%), 因此界面能较大。从界面能和相变应变两方面讨论了各类析出相析出密度差别的原因, 提出了改变析出密度、提高镁铝合金时效强化效果的可能途径。

**关键词:** AZ91 镁铝合金;  $\gamma$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> 析出相; HCP/BCC 相界面; 透射电镜分析

**中图分类号:** TG 111.5

**文献标识码:** A

由于镁合金具有质量轻、比强度和比刚度高, 减震性能好以及易于回收等优点, 因此被认为是 21 世纪最具开发和应用潜力的“绿色材料”<sup>[1]</sup>, 是很有前途的汽车工业材料。而 FCC/BCC(面心立方/体心立方)和 HCP/BCC(密排六方/体心立方)是金属材料中 2 类常见的相界面, 与前者相比, 对后者的研究较少。HCP/BCC 相界面是 HCP  $\leftrightarrow$  BCC 相变的产物, 已有的关于此类相界面微观结构的研究大多集中在 Zr-Nb 和 Ti-Cr<sup>[4, 5]</sup> 合金系中。关于 Mg-Al 合金中 HCP/BCC 相界面微观结构的研究很少。Porter 等<sup>[6]</sup>发现该界面上存在间距为 4~10 nm 的线状特征, 认为那是界面位错。文献[7]对 AZ91 合金中板条析出相的 HCP/BCC 相界面做过高分辨电镜观察, 但未有明确的结论。作者曾详细研究了 AZ91 镁铝合金中 HCP  $\rightarrow$  BCC 相变生成的  $\gamma$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> 析出相(BCC 结构)的形态、时效强化效果和晶体学特征<sup>[8, 9]</sup>, 在本研究中采用常规和高分辨透射电子显微镜进一步研究该析出相与富镁基体间的 HCP/BCC 相界面微观结构。

## 1 实验

采用挪威的 AZ91 镁铝合金, 其成分为: 9% Al, 0.8% Zn, 0.2% Mn, 其余为 Mg。

将合金用电火花切割成 0.9 mm 的薄片后密封在充有少量氩气的耐热玻璃管中, 经 425 °C, 24 h 的固溶处理后水淬, 然后在 200 °C 的油炉中分别时效 8 h 和 48 h(延长时效时间只是为了得到便于观察的粗大析出相, 其形态、点阵结构及晶格常数未变; 但时效超过 24 h 后, 时效硬度从峰值 85 HV 缓慢下降)。用电解双喷减薄仪制备透射电镜试样, 电解液的成分为: 氯化锂 5.3 g, 高氯酸镁 11.16 g, 甲醇 500 mL, 2-丁氧基乙醇 100 mL, 工作温度 -45 °C, 电流为 0.15 A。采用加速电压分别为 200 kV 和 800 kV 的 Philips CM20 常规透射电镜和 JEOL 高分辨透射电镜进行组织和相界面结构观察。

## 2 结果与分析

### 2.1 $\gamma$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> 析出相的形态和晶体学特征

200 °C 时效生成 3 种具有不同形态和晶体学特征的平衡  $\gamma$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> 析出相如表 1、图 1 所示。其中第 1 类占析出相总量的 90% 以上。基体是富镁  $\alpha$  相, 属 HCP 结构,  $a = 0.319$  nm,  $c = 0.518$  nm;  $\gamma$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> 析出相是  $\alpha$ -Mn 型的 BCC 结构,  $a = 1.05797$  nm, 晶胞内含有 58 个原子。电子衍射结果表明, 3 种  $\gamma$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> 析出相及其变体均具有相同的点阵结构和点阵常数; 文献[10]已指出, 即使

① 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(501711027); 国家教育部博士点基金资助项目(98056111)

收稿日期: 2001-12-10; 修订日期: 2002-02-27

作者简介: 肖晓玲(1966-), 女, 讲师, 博士

通讯联系人: 罗承萍, 教授, 博士; 广州 510641 华南理工大学机械工程学院; (020) 87111312; mecpluo@scut.edu.cn

在较低的时效温度下, AZ91合金在析出相变的最 GP 区; 该合金中惟一的析出相是平衡的  $\gamma\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 。关于  $\gamma\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 析出相的多变体和多重位向关系现象已在文献[8]中作了报道。由表 1 看出, 第 1 类析出相以镁基体的基面为惯习面, 而第 2、3 类则以棱柱面为惯习面。虽然 3 种析出相都是条状的, 但其轴线位向不同: 第 1 类与基面平行, 第 2 类与基面正交, 而第 3 类与基面斜交。虽然第 2、3 类的轴线夹角仅  $16^\circ$  但是其轴线指数却相差很远, 前者是  $[111]_\gamma \parallel [0001]_\alpha$ , 后者为  $[001]_\gamma 16^\circ \rightarrow [0001]_\alpha$  3 种位向关系中, 第 2 种( Crawley 关系) 的对称性最好, 但第 1 种( Burgers 关系) 由于是两相中的密排晶面和密排晶向各自平行而具有最佳的匹配, 而第 3 种( Porter 关系) 无论是对称性还是匹配性都最差。

图 1(a) 是在基体的  $[11\bar{2}0]_\alpha$  位向下摄取的, 其

初阶段, 也没有发现  $\gamma\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 析出相的过渡相或中 3 种析出相的轴线位向清楚可见。由于第 1 种析出相的轴线平行于基面  $(0001)_\alpha$ , 所以在所谓“ $a$  轴”位向下( 图 1(a)) 全部第 1 类析出相都彼此平行排列, 虽然它们在所谓“ $c$  轴”位向下( 图 1(b)) 取不同的方向( 共 6 个方向<sup>[8]</sup>)。图 1(b) 中示出了第 2 种析出相的六边形横截面。

2.2 第 1 类析出相的界面

由于析出相颗粒较小, 所以至少有一侧  $(0001)_\alpha \parallel (110)_\gamma$  界面( 惯习面) 被嵌于基体内, 产生晶体重合现象。因此, 在  $[0001]_\alpha \parallel [110]_\gamma$  电子束位向下进行高分辨观察时, 在晶体重合区域内, 两相中 1 对平行或近似平行、并且与入射电子束平行的晶面将产生 Moire 干涉条纹。这种干涉条纹妨碍了单相晶格像的显示。图 2 中右上方便是这样的

表 1 3 类  $\gamma\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 析出相的形态和晶体学特征<sup>[7]</sup>

Table 1 Morphologies and crystallographies of 3 types of  $\gamma\text{-(Mg}_{17}\text{Al}_{12})$  precipitates<sup>[8]</sup>

| Type | Morphology          | Orientation relationship( O. R. )                                                                                                                                   | Habit plane                              | Precipitate axis                                                                                             |
|------|---------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| I    | Lath shaped         | Burgers O. R. :<br>(0001) <sub>α</sub> ∥ (110) <sub>γ</sub><br>[2110] <sub>α</sub> ∥ [111] <sub>γ</sub><br>[0110] <sub>α</sub> ∥ [112] <sub>γ</sub>                 | (0001) <sub>α</sub> ∥ (110) <sub>γ</sub> | Parallel to base plane(0001) <sub>α</sub> , and 18° apart from [2110] <sub>α</sub> ∥ [111] <sub>γ</sub>      |
|      |                     | Crawley O. R. <sup>[11]</sup> :<br>(0001) <sub>α</sub> ∥ (111) <sub>γ</sub><br>[0110] <sub>α</sub> ∥ [110] <sub>γ</sub><br>[2110] <sub>α</sub> ∥ [112] <sub>γ</sub> |                                          |                                                                                                              |
| II   | Hexagonal prismatic | Porter O. R. <sup>[6]</sup> :<br>(0001) <sub>α</sub> 1° → (115) <sub>γ</sub><br>[0110] <sub>α</sub> ∥ [110] <sub>γ</sub>                                            | {0110} <sub>α</sub> ∥ {110} <sub>γ</sub> | Perpendicular to base plane (0001) <sub>α</sub> , i. e. parallel to [0001] <sub>α</sub> ∥ [111] <sub>γ</sub> |
| III  | Short rod shaped    |                                                                                                                                                                     | (0110) <sub>α</sub> ∥ (110) <sub>γ</sub> | Parallel to [001] <sub>γ</sub> lying in habit plane, and 16° apart from [0001] <sub>α</sub>                  |

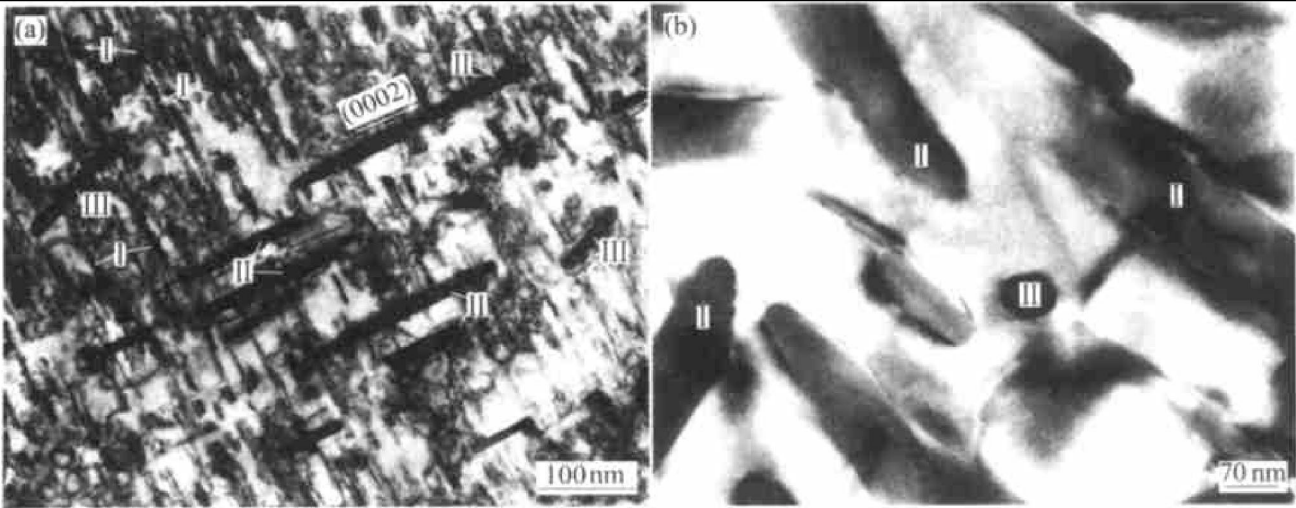


图 1  $\gamma\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 析出相的形态

Fig. 1 Morphologies of  $\gamma\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  precipitates

- (a) —Morphologies of three kinds of precipitates ( I , II, III) formed by aging at 200 °C for 48 h , and viewed along  $[11\bar{2}0]_\alpha$ ;
- (b) —Morphologies of first ( I ) and second ( II ) precipitates produced by aging at 200 °C for 8 h , and viewed along  $[0001]_\alpha$

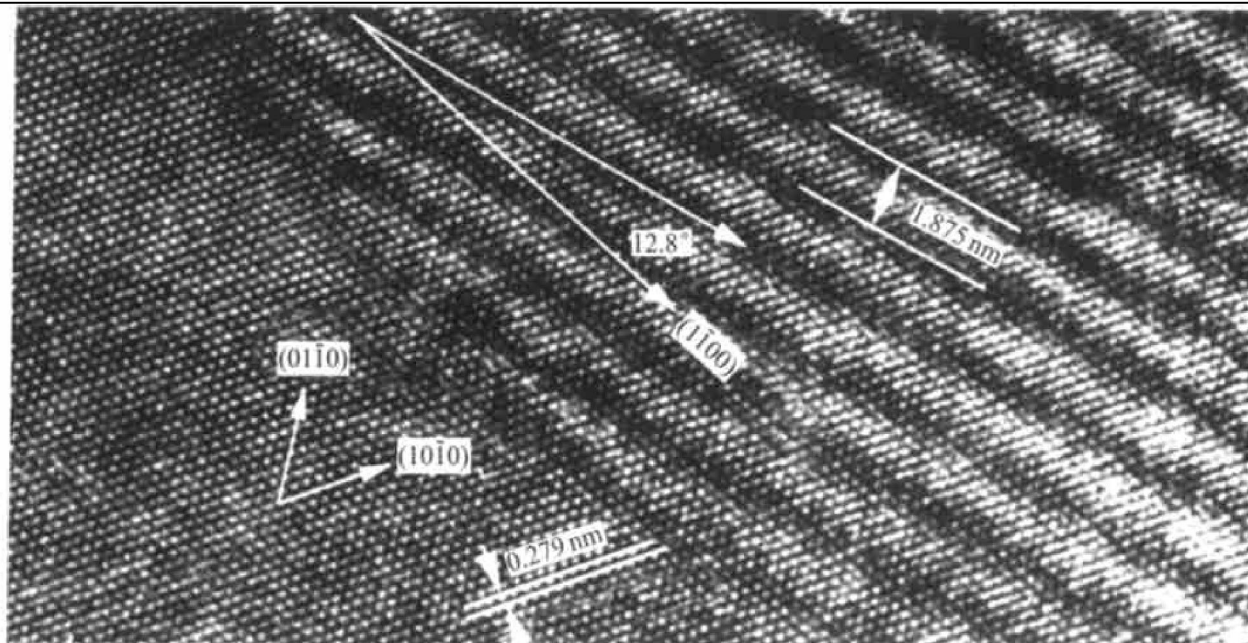


图 2 第 1 类析出相在  $[0001]_{\alpha} \parallel [110]_{\gamma}$  位向下的高分辨电镜像

**Fig. 2** HRTEM image of first precipitate ( I ) viewed along  $[0001]_{\alpha} \parallel [110]_{\gamma}$

(  $[0001]_{\alpha}$  lattice image is shown in bottom-left area,

and thick Moiré fringes produced due to overlapping matrix and precipitate are displayed in top-right area)

区域, 其中较粗的条纹便是基体中的  $(\bar{1}100)_{\alpha}$  与析出相中另一个与入射电子束平行、且与  $(\bar{1}100)_{\alpha}$  也近似平行的晶面结对产生的 Moiré 干涉条纹。文献 [7] 表明, 第 1 类析出相的 F2 界面在  $[0001]_{\alpha} \parallel [110]_{\gamma}$  位向下处于 Edge on 状态, 即与入射电子束平行; 根据 Moiré 干涉条纹的产生原理及其与界面位向的关系<sup>[12]</sup> 可知, 上述 Moiré 干涉条纹平行于该 F2 界面, 从而显示出该界面的真实位向。图 2 中的干涉条纹与  $(\bar{1}100)_{\alpha}$  晶格条纹的夹角为  $12.8^{\circ}$ , 表示 F2 偏离  $(\bar{1}100)_{\alpha}$   $12.8^{\circ}$ , 与实测结果一致<sup>[8]</sup>; 该干涉条纹的间距为 1.875 nm, 也与计算值相符。

图 3(a) 所示是第 1 类析出相的  $(0001)_{\alpha} \parallel (110)_{\gamma}$  界面(惯习面)在  $[\bar{2}110]_{\alpha} \parallel [\bar{1}11]_{\gamma}$  位向下的高分辨像。计算表明,  $\{330\}_{\gamma}$  晶面的衍射强度远大于  $\{110\}_{\gamma}$  和  $\{220\}_{\gamma}$  晶面的衍射强度<sup>[7, 8]</sup>, 所以图 3(a) 显示的是  $\{330\}_{\gamma}$  而非  $\{110\}_{\gamma}$  的晶格像。由图 3(a) 看出,  $(0002)_{\alpha}$  与  $(330)_{\gamma}$  严格平行(面间错配度 4%), “刚性”贴近, 即界面上未发生两相原子面的弛豫现象。对接于该惯习面上的另外 2 组晶面,  $(01\bar{1}1)_{\alpha} \parallel (033)_{\gamma}$  和  $(0\bar{1}11)_{\alpha} \parallel (303)_{\gamma}$  是等效的, 面间错配度和面间夹角分别是 2% 和  $1.9^{\circ}$ , 配合得也非常好。因此, 该界面的应变能(界面能)较低。

图 3(b) 所示是在  $\langle 2110 \rangle_{\alpha}$  位向下摄取的第 1 类析出相 2 个变体的高分辨像, 它包括 3 个区域, 上

方是基体  $\alpha$ , 左下方和右下方分别是彼此对接着的 2 个析出相变体  $\gamma_1$  和  $\gamma_2$ 。 $\gamma_1$  的位向仍然是  $[\bar{1}11]_{\gamma}$ , 而  $\gamma_2$  的位向则靠近  $[\bar{1}15]_{\gamma}$ , 但二者都与基体保持 Burgers 位向关系, 且惯习面也都是  $(0002)_{\alpha} \parallel (330)_{\gamma}$ 。 $\gamma_1$  和  $\gamma_2$  中形成了彼此平行的  $(330)_{\gamma}$  晶格像; 由于  $\gamma_1$  被基体覆盖而呈现 Moiré 条纹, 而  $\gamma_2$  则没有。 $\gamma_1/\alpha$  界面上示出了  $(0002)_{\alpha}$  与  $(330)_{\gamma}$  晶面对接排列的情况, 可见二者几乎完全匹配, 未见弛豫现象; 而  $\gamma_2/\alpha$  界面, 即  $(0002)_{\alpha} \parallel (330)_{\gamma}$  界面上则示出了这 2 个晶面与图 3(a) 类似的“刚性”并列情况。

### 2.3 第 2 类析出相的界面

图 4 所示为第 2 类析出相的  $(01\bar{1}0)_{\alpha} \parallel (\bar{1}10)_{\gamma}$  界面(惯习面)在  $[\bar{2}110]_{\alpha} \parallel [\bar{1}12]_{\gamma}$  位向下的高分辨像。其中  $(0002)_{\alpha}$  与  $(222)_{\gamma}$  在界面上对接, 此  $(0002)_{\alpha} \parallel (222)_{\gamma}$  实际上是析出相六棱柱的端界面。 $(222)_{\gamma}$  的面间距为 0.305 nm,  $(0002)_{\alpha}$  的面间距为 0.261 nm, 所以 7 个  $(0002)_{\alpha}$  晶面间距约相当于 6 个  $(222)_{\gamma}$  晶面间距。图 4 中标出了 7 个这样的间距。即在每 6 个  $(222)_{\gamma}$  晶面距离内, 便有一个多余的  $(0002)_{\alpha}$  晶面, 界面上应变(错配度)较大(15%)。为了降低其上的应变, 该界面发生弛豫, 使应变集中到多余原子面附近, 形成界面错配度位错, 而在多余原子面之间则是匹配较好(共格程度

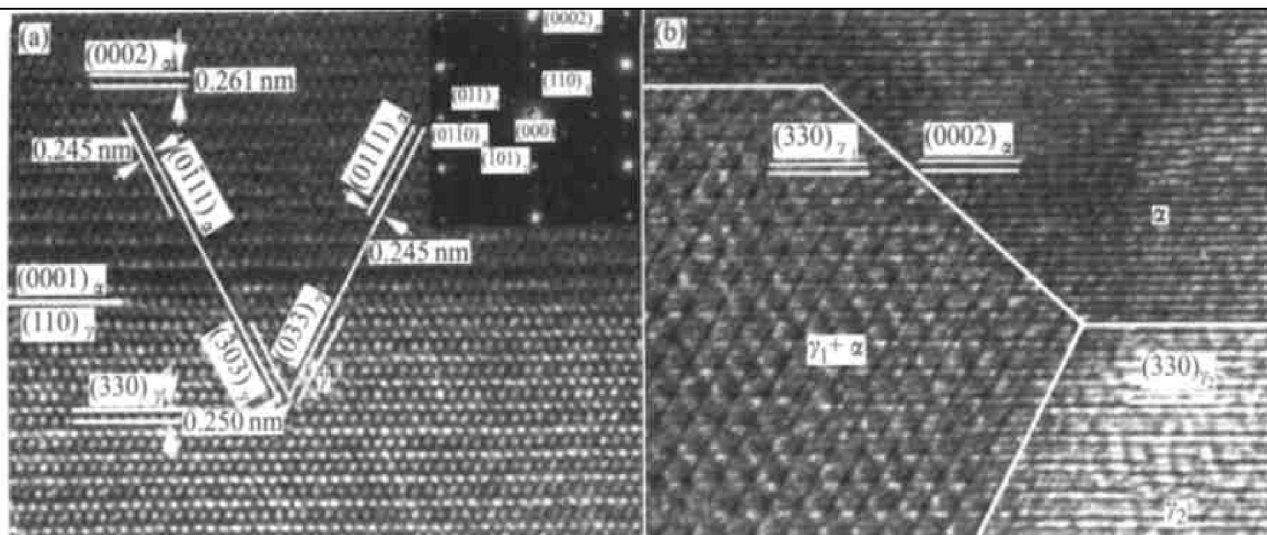


图 3 第 1 类析出相的  $\alpha/\gamma$  界面的高分辨电镜像

**Fig. 3** HRTEM images of  $\alpha/\gamma$  interphase boundaries of the first kind of precipitate

(a) —  $(0001)_\alpha \parallel (110)_\gamma$  interface viewed along  $[\bar{2}110]_\alpha \parallel [\bar{1}11]_\gamma$ ;

(b) — Interfaces formed among matrix ( $\alpha$ ) and two end-to-end butted particles

(variants  $\gamma_1, \gamma_2$ ) of the first precipitates, viewed along  $[\bar{2}110]_\alpha$ , and Moire fringes formed within ( $\gamma_1 + \alpha$ ) area due to crystal overlapping

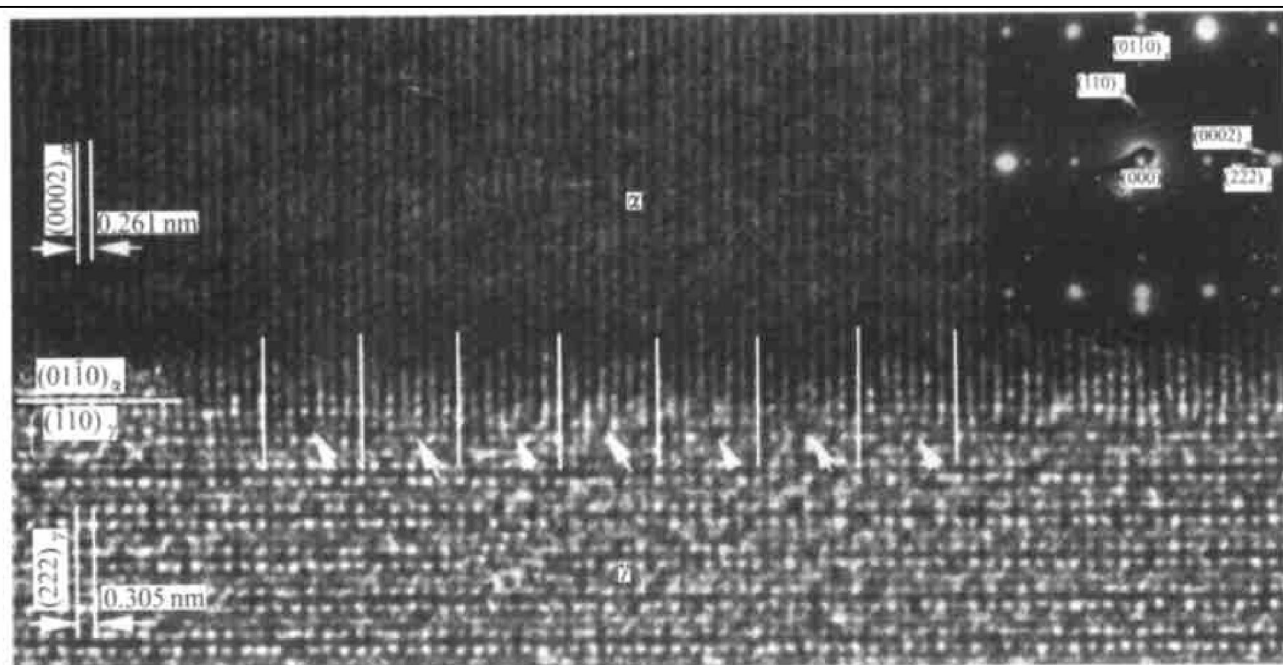


图 4 第 2 类析出相的  $(01\bar{1}0)_\alpha \parallel (\bar{1}10)_\gamma$  界面在  $[\bar{2}110]_\alpha \parallel [\bar{1}12]_\gamma$  位向下的高分辨电镜像

**Fig. 4** HRTEM image of  $(01\bar{1}0)_\alpha \parallel (\bar{1}10)_\gamma$  interface of the second kind of precipitate

(viewed along  $[\bar{2}110]_\alpha \parallel [\bar{1}12]_\gamma$  and showing regular interfacial misfit dislocation array formed due to strain relaxation across interface)

较高) 的区域。弛豫结果使整个界面成为部分共格相界面。图 4 中箭头所指部位原子面匹配较差, 它们便是界面上应变集中处, 即错配度位错所在位置。此外,  $(01\bar{1}0)_\alpha \parallel \{330\}_\gamma$  的面间错配度也达到 11%。可见, 第 2 类析出相的界面匹配程度远比第 1 类的差, 因此, 其界面应变能(界面能)也远比第 1

类的高。值得指出的是, 虽然第 3 类析出相的惯习面与第 2 类的相同, 即同为  $(01\bar{1}0)_\alpha \parallel \{330\}_\gamma$ , 但对接于其上的晶面(接近  $(0002)_\alpha \parallel (\bar{1}1\bar{5})_\gamma$ )的面间错配度比第 2 类的还要差。另外, 由于第 3 类析出相的数量很少(比第 1, 2 类的都少), 而且对此类析出相进行高分辨电镜观察的几何条件较苛刻, 所以对

该析出相界面的高分辨观察比较困难。具体而言, 对第 2, 3 类析出相, 仅当界面  $(01\bar{1}0)_\alpha \parallel \{330\}_\gamma$  与入射电子束平行时才能进行高分辨图像观察; 第 2 类析出相有 3 组这样的界面, 而第 3 类只有 1 组 (表 1), 所以即使能遇上第 3 类析出相, 其位向也不一定适合高分辨观察。

## 2.4 界面结构、析出密度与时效强化效果

AZ91 的时效强化效果不显著, 与占析出相总量 90% 以上的第 1 类析出相的形态和晶体学位向有关<sup>[8, 10]</sup>。一方面, 这类析出相虽然较多, 但颗粒比较粗大, 其时效强化自然较差。更重要的是, 这类析出相是分布在镁的  $(0001)$  基面内的, 而镁在常温下的滑移面也是  $(0001)$  基面, 因此这类析出相颗粒不能有效地阻碍位错在基面上的滑移, 时效强化效果欠佳。相反, 第 2, 3 类析出相由于是与基面垂直或近似垂直的, 所以有利于阻碍位错的基面滑移, 即有利于时效强化, 但是其数量却太少。

然而析出相的界面结构和晶体学特征均有利于第 1 类析出相的析出, 而不利第 2, 3 类的析出。根据电镜观察和进一步的计算发现, 第 1 类析出相以其轴线平行于相变不变线 (相变应变为 0 的晶向)<sup>[8]</sup>, 相变应变能较小; 并且其应变能 (界面能) 较小, 所以其析出密度最大。第 2 类析出相虽然具有对称性很好的 Crawley 位向关系, 但其应变能 (界面能) 较大, 且其轴线不是相变不变线方向, 所以其生成几率远比第 1 类的小。第 3 类析出相的情况与第 2 类的相似, 并且其位向关系的对称性更差, 所以其生成几率比第 2 类的还要小。这些推论都与实验观察结果一致。因此, 如何通过合金化和热处理增加第 2, 3 类析出相的析出密度并使之细化, 同时抑制第 1 类析出相的析出, 应是提高这类合金时效强化效果的有效途径之一, 也是一个值得进一步深入研究的课题<sup>[8, 9]</sup>。

关于 3 种析出相与相变不变线关系的问题, 文献<sup>[8]</sup>已作过相关的报道。文献<sup>[13, 14]</sup>表明, HCP  $\rightarrow$  BCC 析出相的不变线都与基面  $(0001)$  平行, 即那些受不变线应变控制的板条状析出相, 其轴线在基面内。第 1 类析出相即属此。第 2, 3 类析出相因其轴线是与基面正交或斜交的 (见表 1), 因此目前看来都不符合不变线应变原则。不过, 作为理论探讨的题目, 作者正在考虑不同合金系中可能存在的相变不变线的多重性问题。

## 3 结论

1) 第 1 类析出相的惯习面由彼此平行的  $\{330\}_\gamma$  和  $(0002)_\alpha$  刚性并列而成, 惯习面本身以及对接于其上的另 2 组主要晶面的面间错配度都很小 (4% 和 2%), 因此该惯习面是个低能量的界面。

2) 第 2 类析出相的惯习面  $(01\bar{1}0)_\alpha \parallel (\bar{3}30)_\gamma$  上每 6 个  $(222)_\gamma$  晶面与 7 个  $(0002)_\alpha$  晶面对接, 界面发生弛豫; 惯习面本身、以及对接于其上的主要晶面  $(0002)_\alpha \parallel (222)_\gamma$  的面间错配度都较大 (15% 和 11%), 因此该惯习面是个高能量的界面。

3) 由于第 1 类析出相惯习面的能量较低, 而第 2, 3 类析出相惯习面的能量较高, 加之第 1 类析出相的轴线平行于相变不变线, 导致前者的相变应变能比后二者的低。结果, 强化效果较差的第 1 类析出相的析出密度远比强化效果较好的第 2, 3 类的高, 因此使该合金的时效强化效果降低。

## REFERENCES

- [1] 刘 正, 王 越, 王中光, 等. 镁基轻质材料的研究与应用[J]. 材料研究学报, 2000, 14(5): 449 - 456.  
LIU Zheng, WANG Yue, WANG Zhong-guang, et al. Developing trends of research and application of magnesium alloys[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2000, 14(5): 449 - 456.
- [2] Perovic V, Weatherly G C, Simpson C J. Hydride precipitation in  $\alpha/\beta$  zirconium [J]. Acta Metall, 1983, 31(5): 1381 - 1391.
- [3] Perovic V, Weatherly G C. The  $\beta$  to  $\alpha$  transformation in a Zr-2.5wt.% Nb alloy [J]. Acta Metall, 1989, 37(3): 813 - 821.
- [4] Menon E S K, Aaronson H I. Interfacial structure of widmanstatten plates in a Ti-Cr alloy [J]. Acta Metall, 1986, 34(10): 1975 - 1981.
- [5] Furuhashi T, Aaronson H I. Computer modeling of partially coherent BCC: HCP boundaries [J]. Acta Metall Mater, 1991, 39(11): 2857 - 2872.
- [6] Porter D A, Edington J W. Microanalysis and cell boundary velocity measurements for the cellular reaction in a Mg-9% Al alloy [J]. Proc R Soc A, 1977, 358(3): 335 - 350.
- [7] Duly D, Zhang W Z, Audier M. High-resolution electron microscopy observations of the interface structure of continuous precipitates in a Mg-Al alloy and interpretation with the O-lattice theory [J]. Philos Mag A, 1995, 71(1): 187 - 204.
- [8] 肖晓玲, 罗承萍, 聂建峰, 等. AZ91 镁铝合金中 HCP  $\rightarrow$  BCC 析出形态及晶体学特征[J]. 金属学报, 2001, 37(1): 1 - 7.

- XIAO Xiao-ling, LUO Cheng-ping, NIE Jian-feng, et al. Morphology and crystallography of  $\beta$ -(Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>) precipitate in an AZ91 magnesium-aluminum alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2001, 37(1): 1-7.
- [9] 罗承萍, 肖晓玲, 刘江文, 等. AZ91 Mg-Al 合金中  $\beta$ -(Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub>) 析出相的多重位向关系及 {112} 伪孪晶关系[J]. 金属学报, 2002, 38(7): 709-714.
- LUO Cheng-ping, XIAO Xiao-ling, LIU Jiang-Wen, et al. Multi-orientation relationship and {112} pseudo-twin relationship of  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> precipitates in an AZ91 Mg-Al alloy [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2002, 38(7): 709-714.
- [10] Clark J B. Age hardening in a Mg-9wt. % Al alloy [J]. Acta Metall, 1968, 16(2): 141-152.
- [11] Crawley A F, Lagowski B. Effect of two-step aging on the precipitate structure in magnesium alloy AZ91 [J]. Metall Trans, 1974, 22(4): 949-951.
- [12] Luo C P, Dahmen U. The interphase boundary structure of faceted lath-shaped Cr precipitates in a Cu-0.33wt. % Cr alloy [J]. Acta Materialia, 1998, 46(6): 2063-2081.
- [13] Luo C P, Weatherly G C. The precipitation behaviour of a Zr-2.5wt. % Nb alloy [J]. Metall Trans, 1988, 19A(5): 1153-1160.
- [14] XIAO Xiao-ling, LUO Cheng-ping, LIU Jiang-wen. Invariant line and crystallography of HCP  $\rightarrow$  BCC precipitation[J]. Science in China(E), 2002, 45(1): 58-64.

## Structure of HCP/ BCC interphase boundaries in AZ91 Mg-Al alloy

XIAO Xiao-ling<sup>1</sup>, LUO Cheng-ping<sup>1</sup>, LIU Jiang-wen<sup>1</sup>, WU Dong-xiao<sup>1</sup>,  
NIE Jian-feng<sup>2</sup>, Barry C Muddle<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical Engineering, South China University of Technology,  
Guangzhou 510641, China;

2. Department of Materials Engineering, Monash University, Clayton, Victoria 3168, Australia)

**Abstract:** The HCP/ BCC interphase boundaries between the Mg matrix and  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> precipitates for two kinds of precipitates produced in an aged AZ91 Mg-Al alloy were characterized using both conventional and high resolution TEM. It is found that the planar misfit across the (0002)<sub>α</sub> // {330}<sub>β</sub> habit plane of the first kind of precipitate is very low (< 4%), thus forming a low (strain) energy interface, while that across the (0110)<sub>α</sub> // ( $\bar{3}$ 30)<sub>β</sub> habit plane of the second kind of precipitate is markedly high (15%), thus producing a high (strain) energy interface. The difference in precipitation density of various kinds of precipitate was interpreted in terms of the interfacial energy, and of the strain induced by the precipitation; and plausible ways of altering the relative densities of the precipitates so as to enhance the precipitation-strengthening effect of the alloy were proposed.

**Key words:** AZ91 Mg-Al alloy;  $\beta$ -Mg<sub>17</sub>Al<sub>12</sub> precipitate; HCP/ BCC interphase boundary; TEM

(编辑 陈爱华)