

铸造 Mg-3Zn-1.5Cu-0.6Zr 镁合金的时效硬化及析出相

李爱文¹, 刘江文¹, 伍翠兰², 罗承萍¹, 焦东玲¹, 朱红梅¹

(1. 华南理工大学 材料科学与工程学院, 广州 510640; 2. 湖南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410082)

摘要: 利用光学显微镜、显微硬度计、X 射线衍射仪、扫描电镜和透射电镜分析时效热处理(T6)后的 Mg-3Zn-1.5Cu-0.6Zr 镁合金的析出相。结果表明: 合金铸态组织主要由初晶 Mg 基体和非平衡共晶组织 (Mg+Mg₂Cu, CuMgZn) 组成; 经固溶处理, 晶界处大部分非平衡共晶组织溶解。经 180 ℃, 16 h 时效后, 合金达到时效硬度峰值, 此时晶内析出相主要有 3 类: 1) 少量棒状的过渡相 β_1' - α (可能是 Mg₄Zn₇), 其轴线垂直于 (0001)_{Mg}, 长度大约 50 nm; 2) 大量弥散分布的板条状和棱柱状的 β_2' -MgZn₂, 其轴线垂直于 (0001)_{Mg}, 长度为 50~150 nm, 该相是合金的主要时效硬化相; 3) 少量短杆状的 β -MgZn, 其轴线平行于 (0001)_{Mg}, 长度约 20 nm。

关键词: 镁合金; Mg-Zn-Cu 镁合金; MgZn₂; MgZn; 显微组织; 时效硬化

中图分类号: TG146

文献标志码: A

Age-hardening behavior and precipitates of as-cast Mg-3Zn-1.5Cu-0.6Zr Mg alloy

LI Ai-wei¹, LIU Jiang-wen¹, WU Cui-lan², LUO Cheng-ping¹, JIAO Dong-ling¹, ZHU Hong-mei¹

(1. School of Materials Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The morphologies of the precipitates formed in an aged Mg-3Zn-1.5Cu-0.6Zr alloy were analyzed with optical microscope, microhardness tester, X-ray diffractometry (XRD), scanning electron microscope (SEM) and transmission electron microscope (TEM). The results show that the microstructure of the as-cast alloy is composed of the Mg matrix and nonequilibrium eutectic (Mg+Mg₂Cu, CuMgZn) formed at the grain boundaries, and a majority of the nonequilibrium eutectics are dissolved after solution treatment. There are mainly three types of precipitates of alloy after aging at 180 ℃ for 16 h. The first one is a small amount of rod-like β_1' - α (possibly Mg₄Zn₇), which has an average length of about 50 nm and is perpendicular to the base plane (0001)_{Mg} of the Mg matrix. The second type of precipitate is a lath-like or prismatic β_2' -MgZn₂ with high-density and length of 50~150 nm, which is also perpendicular to the base plane of the Mg matrix and serves as the principal hardening phase of the aged alloy. The third precipitate is the short-rod like equilibrium β -MgZn, also in a small amount, with average length of about 20 nm and its axis is parallel to the base plane of the Mg matrix.

Key words: Mg alloy; Mg-Zn-Cu Mg alloy; MgZn₂; MgZn; microstructure; age-hardening

Mg-Zn 系合金具有明显的时效硬化特性^[1], 可以通过固溶时效处理来提高合金的强度。Mg-Zn 二元合金强度较低, 晶粒粗大且不均匀, 通过添加 Zr 和 Ti

可以细化合金晶粒^[2]。合金化稀土元素 Y、Ce 和 Nd 等可以显著改善合金的铸造性能和高温力学性能^[3-6], 但同时也大大增加了合金的成本。在 Mg-Zn 合金中添

加 Cu 不仅可以改善合金的铸造性能(增强流动性),而且在随后的时效过程中可以显著增强合金的时效硬化效应^[7-8]。此外,Cu 可以提高 Mg-Zn 合金的共晶温度,允许合金使用更高的固溶温度^[9]。Mg-Zn 系合金的析出强化过程较为复杂,据报导^[8-13],在高于 150 的人工时效过程中,Mg-Zn-Cu 合金的时效析出过程与 Mg-Zn 二元合金相同:过饱和固溶体 固溶原子聚集 G.P.区/ β_1 垂直于(0001)_{Mg} 棒状或块状的 β_1' -a(a 可能为 Mg₄Zn₇) 平行于(0001)_{Mg} 盘状或垂直于(0001)_{Mg} 板条状的 β_2' -MgZn₂ 平衡稳定相 β (MgZn 或 Mg₂Zn₃)。但上述各阶段析出相特别是初期析出相(G.P.区和 β_1')的结构、成分以及热稳定性还没有被完全表征和确定。很多的研究报导^[8,10]认为 β_1' 相为 Mg-Zn 的主要时效强化相。目前,有关 Mg-Zn-Cu 镁合金的研究集中于高锌系,对低锌的 Mg-Zn-Cu 合金时效过程中析出相种类和显微组织演变的研究较少。本文作者对经固溶时效热处理(T6)的 Mg-3Zn-1.5Cu-0.6Zr 镁合金的第二相形貌和种类进行较为全面的研究,初步确定时效 Mg-3Zn-1.5Cu-0.6Zr 镁合金中第二相的形态和种类以及合金的主要时效硬化相。

1 实验

本研究使用的镁合金熔炼是在 5.5 kg 容量的钢制坩埚中进行的,铜和锆都是采用中间合金的方式加入,分别为 Mg-28.78Cu 和 Mg-31.63Zr;熔铸时采用 SF₆ 气体保护,砂模铸造成标准拉伸试样。采用电感耦合等离子体原子发射光谱仪(ICP)分析试验镁合金实际成分(质量分数),见表 1。根据相关相图、文献以及结合实验测定,制定本研究的热处理工艺为 440 固溶 24 h,水淬,并在 180 时效 0~72 h。为了避免镁合金氧化,在固溶时用 MgO 粉末包覆保护,时效加热介质为甲基硅油。

采用 HV-1000 型显微硬度计测量试样的显微硬度,加载载荷为 0.98 N,保持时间 15 s,试样硬度取 10 次测量平均值。测试前,在水磨砂纸上逐级打磨试样,直至采用 1500#砂纸为止,经抛光后用 3%硝酸酒精溶液腐蚀。为正确反映时效析出的强化效果,显微硬度测试仪压头打在试样的基体晶粒内部。金相及扫描电镜样品均使用 3%HNO₃ 酒精溶液进行腐蚀。金相观察在 Leica DMIRM/DFC320 金相显微镜上进行。在附有能谱仪的 LEO1530vp 型扫描电子显微镜(SEM)上进行高倍显微组织观察和微区成分分析(EDS),采用背散射电子(BSE)成像。X 射线衍射分析(XRD)在

Philips X-pert Pro 衍射仪上进行,管压 40 kV, CuK α , $\lambda=1.5406 \text{ \AA}$ 。采用电解双喷法制备透射电子显微分析(TEM)用薄膜样品。电解液成分为: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,硝酸 30 mL;工作电流为 30 mA,温度为-30。TEM 分析在 JEOL100CX 型透射电镜上进行,加速电压为 120 kV。

表 1 实验用镁合金的合金成分

Table 1 Chemical composition of Mg-3Zn-1.5Cu-0.6Zr alloy (mass fraction, %)

Zn	Cu	Zr	Mg
2.91	1.51	0.58	Bal.

2 结果与分析

2.1 时效硬化曲线

Mg-3Zn-1.5Cu-0.6Zr 镁合金经 440 固溶 24 h 和 180 时效不同时间(0~72 h)后的显微硬度如图 1 所示。由图 1 可看出,合金铸态显微硬度为 HV52.36,经 440 固溶后,显微硬度为 HV53.44,时效初期合金的硬度值随时效时间的延长而逐渐增加,其中在 0~4 h 增加趋势较明显,4 h 后增加趋势逐渐平缓,直至 16 h 达到最高时效硬度峰值 HV65.12,之后随时效时间的延长硬度逐渐下降,30 h 之后即为过时效阶段,72 h 时效后显微硬度降到 HV55.98。

2.2 X 射线衍射分析

图 2 所示为 Mg-3Zn-1.5Cu-0.6Zr 镁合金在铸态、

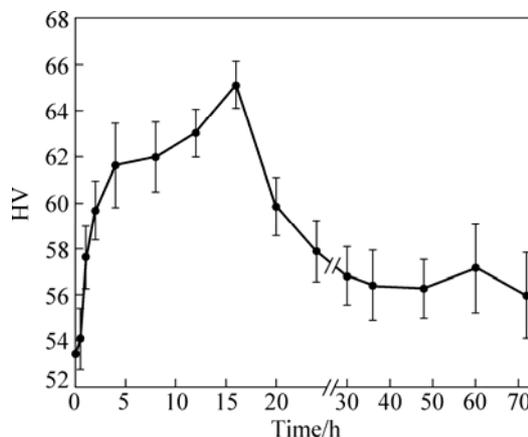


图 1 Mg-3Zn-1.5Cu-0.6Zr 合金的时效硬化曲线

Fig.1 Effect of aging time on microhardness of Mg-3Zn-1.5Cu-0.6Zr Mg alloy after being solution treated at 440 for 24 h and aged at 180

固溶态、(180 °C, 4 h)和(180 °C, 16 h)时效态下的 XRD 谱。由图 2 可看出,无论是铸态、固溶态还是时效态,该合金的主要相组成为 Mg 固溶体,三元合金相 CuMgZn,二元合金相 Mg₂Cu、MgZn₂和 MgZn。CuMgZn 属于四方晶系, $a=0.5069\text{ nm}$, $b=0.7169\text{ nm}$, 空间群为 $P\bar{4}(81)$; Mg₂Cu 属于正交晶系, $a=0.9070\text{ nm}$, $b=0.5284\text{ nm}$, $c=1.8250\text{ nm}$, 空间群为 Fddd(70); MgZn₂ 属于六方晶系, $a=0.518\text{ nm}$, $c=0.852\text{ nm}$, 空

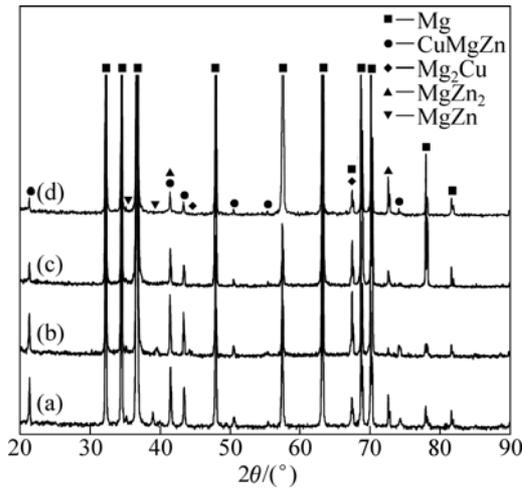


图 2 Mg-3Zn-1.5Cu-0.6Zr 镁合金的 XRD 谱

Fig.2 XRD patterns of Mg-3Zn-1.5Cu-0.6Zr Mg alloy: (a) As-cast; (b) Solution treated at 440 °C for 24 h; (c) Aged at 180 °C for 4 h; (d) Aged at 180 °C for 16 h

间群为 $P6_3/mmc(194)$; MgZn 属于单斜晶系^[14], $a=1.610\text{ nm}$, $b=2.579\text{ nm}$, $c=0.880\text{ nm}$ 。

观察各状态的 XRD 谱还可以发现,虽然合金固溶时效前后物相组成上没有发生变化,但从衍射峰的强度来看,各相的相对含量有变化。在铸态和固溶态, CuMgZn 和 MgZn 的衍射峰的相对强度明显要高于时效态的;而 MgZn₂ 衍射峰的相对强度则随时效时间的延长逐渐增强。这说明经固溶处理,大部分 CuMgZn 和 MgZn 溶解,在随后的时效过程中,随时效时间的延长, MgZn₂ 析出得越来越多。

2.3 光学金相分析

图 3 所示为 Mg-3Zn-1.5Cu-0.6Zr 镁合金的光学金相组织。由图 3 可看出,铸态下合金的显微组织主要由基体 Mg 固溶体和沿晶界的共晶组织组成,呈连续网状分布,晶粒内部有少量的第二相粒子。结合 XRD、SEM 及 EDS 分析结果可知,晶界网状共晶组织主要由 Mg 和 Mg₂Cu 以及 CuMgZn 相组成。经 440 °C, 24 h 固溶处理后,合金晶内出现很多花瓣状组织,它们的形成可能跟成分偏析有关。同时晶界处大部分非平衡共晶组织溶解,与铸态组织相比,晶界明显变得纤细了许多(见图 3(b))。图 3(c)和(d)分别为合金经 180 °C, 4 h 和 180 °C, 16 h 时效后的显微组织。随着时效时间的延长,晶内析出相的数量逐渐增加。

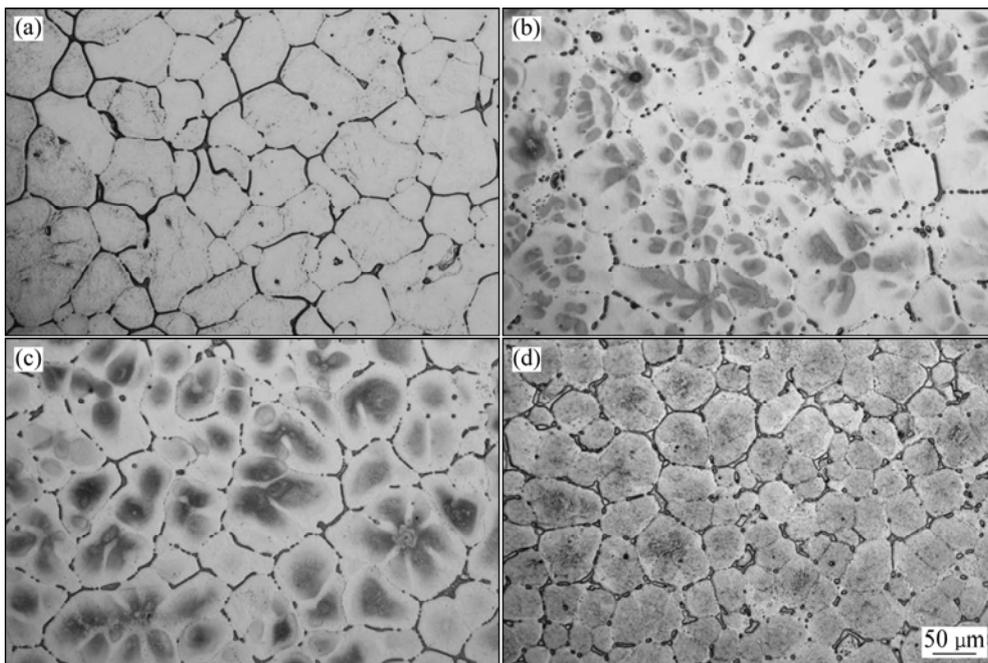


图 3 Mg-3Zn-1.5Cu-0.6Zr 镁合金的光学金相显微组织

Fig.3 Optical micrographs of Mg-3Zn-1.5Cu-0.6Zr Mg alloy: (a) As-cast; (b) Solution treated at 440 °C for 24 h; (c) Aged at 180 °C for 4 h; (d) Aged at 180 °C for 16 h

2.4 扫描电镜及能谱分析

为了进一步确定 Mg-3Zn-1.5Cu-0.6Zr 镁合金各种状态下晶界组织的精细特征,用 SEM 背散射电子像和 EDS 微区成分分析晶界组织形态和相成分。图 4 所示为合金的背散射电子像及微区成分分析结果。由图 4 可看出,由于 Zn 和 Cu 的原子序数均高于 Mg 的,因此用背散射电子成像时,含 Zn 和 Cu 高的相会显得较亮。从图 4(a)可以清楚地看到,铸态晶界处鱼骨状的共晶组织,呈连续薄片状分布于晶界和枝晶臂。通过对比发现,固溶后合金晶界处的共晶组织大部分溶解,时效过程中晶界组织变化不大。为了进一步确定合金晶界组织的相成分,对图 4(b)箭头所指的两处较暗和较亮的共晶相(1 和 2)进行能谱分析(见图 4(d)和(e))。分析结果表明,较暗共晶相(1,见图 4(d))主要为 Mg 和 Cu,还有少量的 Zn;较亮的共晶相(2,见图 4(e))中 Zn 和 Cu 的质量分数分别为 25.38%和 22.18%,结合 XRD 分析,合金晶界较暗的共晶组织主要为 Mg_2Cu (含少量 Mg-Zn 二元相),较亮的共晶组织为 CuMgZn。所以,合金晶界处共晶组织主要由 Mg+

$Mg_2Cu+CuMgZn$ 组成。图 4(c)所示为合金经 180 , 16 h 时效后的显微组织。由图 4(c)可以明显看到,经时效处理后合金的晶内出现了许多的细小析出相,具体形态和位向关系则需通过 TEM 来观察分析。

2.5 透射电镜分析

为了进一步观察研究析出相的形貌与位向,从 3 个不同的晶带轴下观察时效峰值状态(180 , 16 h)的晶内析出相(见图 5)。从 $B=[2\bar{1}\bar{1}0]_{Mg}$ (见图 5(a))和 $B=[01\bar{1}0]_{Mg}$ (见图 5(b))方向观察可见大量相互平行的棒状和板条状析出相,轴线垂直于 $(0001)_{Mg}$, 长度为 50~150 nm。此外,还发现极少数的点状相。目前的研究^[8-12]表明,这类垂直于 $(0001)_{Mg}$ 的析出相为棒状的 β_1' 相或板条状的 β_2' 相,为合金的主要强化相。从 $B=[0001]_{Mg}$ (见图 5(c))方向能清楚地观察到这类析出相的横截面。从析出相横截面可以看出,除了存在棒状的 β_1' 和板条状的 β_2' 外,还有一类横截面呈四边形,轴线垂直于 $(0001)_{Mg}$ 的棱柱状析出相。在图 5(c)中还能观察到极少数短杆状相 β , 长度约 20 nm, 对应图

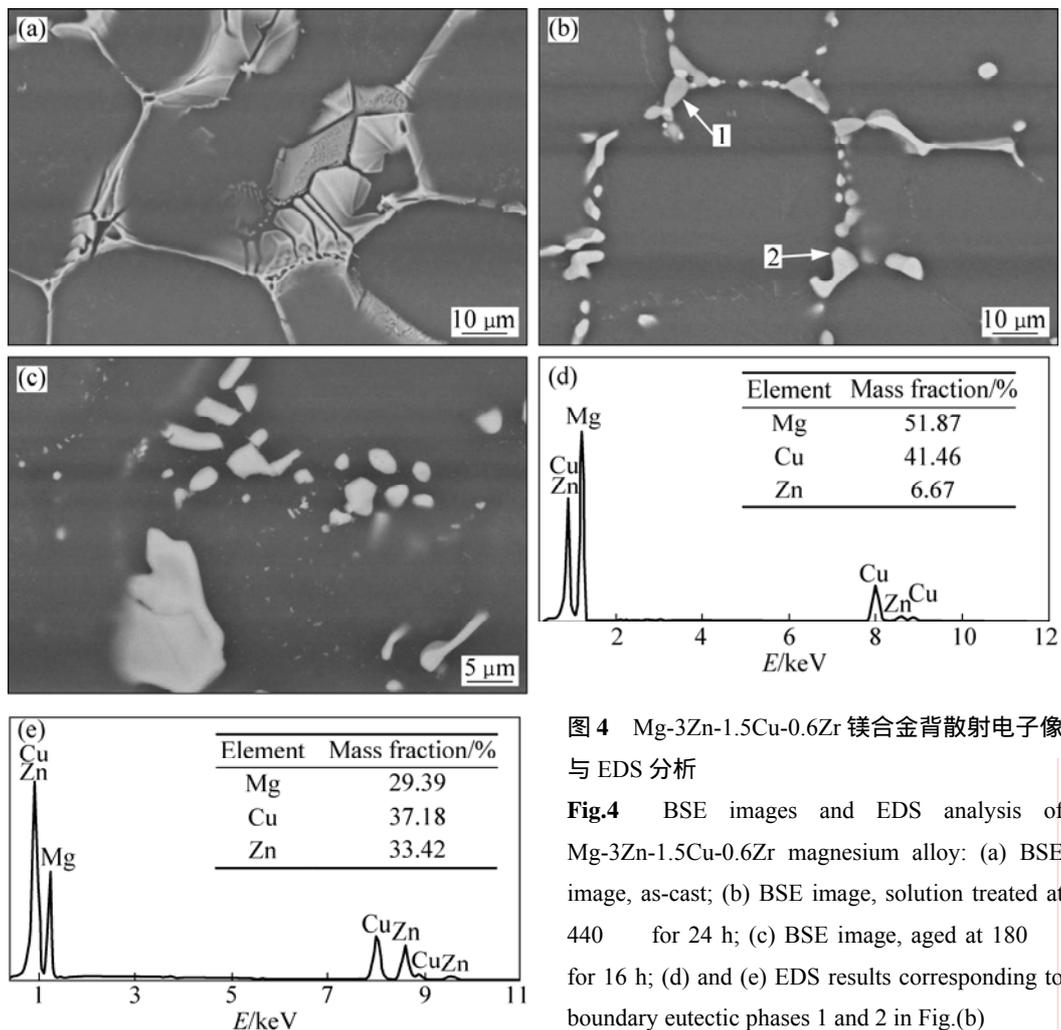


图 4 Mg-3Zn-1.5Cu-0.6Zr 镁合金背散射电子像与 EDS 分析

Fig.4 BSE images and EDS analysis of Mg-3Zn-1.5Cu-0.6Zr magnesium alloy: (a) BSE image, as-cast; (b) BSE image, solution treated at 440 for 24 h; (c) BSE image, aged at 180 for 16 h; (d) and (e) EDS results corresponding to boundary eutectic phases 1 and 2 in Fig.(b)

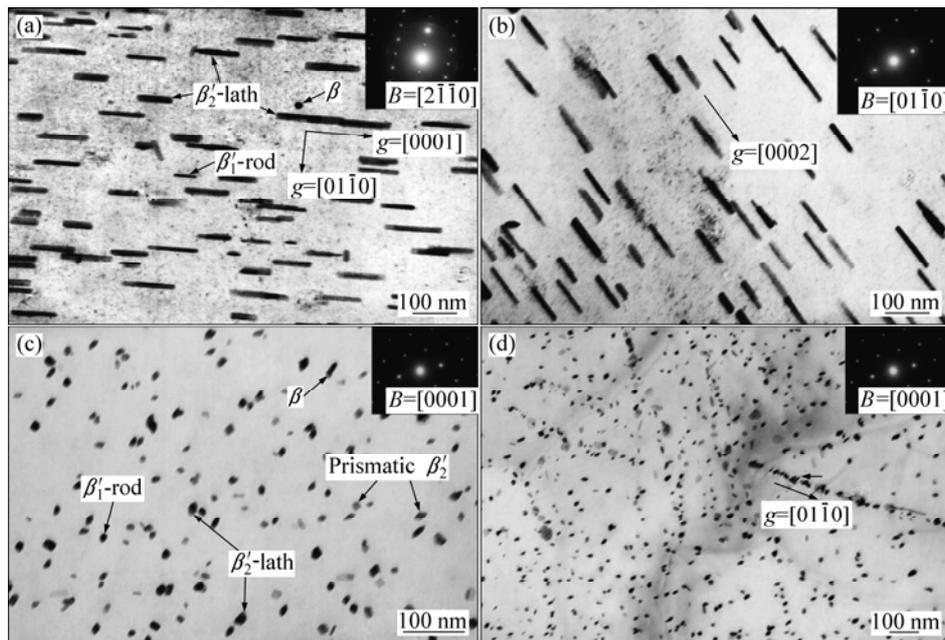


图 5 不同晶带轴下析出相的 TEM 像

Fig.5 TEM images showing peak-aged T6 microstructures: (a) $B=[2\bar{1}\bar{1}0]_{\text{Mg}}$; (b) $B=[01\bar{1}0]_{\text{Mg}}$; (c) and (d) $B=[0001]_{\text{Mg}}$

5(a)中的点状相。此外,经观察分析,从图 5(d)中还能发现沿 $[2\bar{1}\bar{1}0]_{\text{Mg}}$ 的析出线(如在 $(01\bar{1}0)_{\text{Mg}}$ 上,图 5(d)箭头所指区域),这说明析出相在这里优先形核。BUHA 和 OHKUBO^[8]与 BUHA^[11]以及 KELLY 和 NICHOLSON^[15]的研究表明,当析出相的密度逐渐增大时它们之间的应力场会影响析出相的生长,结果造成析出相沿某个方向析出或聚集在某个晶面上。图 5(d)中的析出线(箭头所指区域)是在析出相(β_1' , β_2')的应力场影响下导致了析出相沿线(带)状分布。

综合以上 TEM 分析, Mg-3Zn-1.5Cu-0.6Zr 镁合金在时效硬度峰值状态(180, 16 h)的析出相主要有 3 类: 1) 少量棒状的 β_1' 相, 轴线垂直于 $(0001)_{\text{Mg}}$, 长度大约 50 nm; 2) 大量弥散分布、板条状和棱柱状的 β_2' 相, 轴线垂直于 $(0001)_{\text{Mg}}$, 长度在 50~150 nm; 3) 极少数的短杆状 β 相, 轴线平行于 $(0001)_{\text{Mg}}$, 长度约 20 nm。

对时效过程中形成的轴线垂直于 $(0001)_{\text{Mg}}$ 的 β_2' 相进行电子衍射分析。在常规下, TEM 像没有得到这些析出相的完整衍射花样(见图 6)。图 6(c)和(d)中析出相衍射斑点是由不同变体的 β_2' 贡献的, 不能构成完整的衍射花样。因此, 不能通过标定电子衍射花样来鉴定该类析出相。经倾转试样, 在 $B=[\bar{1}2\bar{1}3]_{\text{Mg}}$ (标定如图 6(c))时, 发现有 2 个独立的析出相衍射斑点(g_1 , g_2)。图 6(a)和(b)分别为析出相的明场相和暗场相($g=g_1$), 对 g_2 做暗场也同样能得到析出相的暗场相。用内标法可以求得相机常数为 $K=20.4860 \text{ mm}\cdot\text{\AA}$, 再由 $K=Rd(R$

为衍射斑到中心斑的距离; d 为晶面间距)可以求得这 3 个析出相衍射斑点所对应的晶面间距, 它们分别为 $d_{g_1}=4.192 \text{ \AA}$, $d_{g_2}=3.942 \text{ \AA}$ 。通过查询 PDF 卡片发现它们与 MgZn_2 的晶面间距 $d_{(0002)}=4.260 \text{ \AA}$, $d_{(10\bar{1}1)}=3.969 \text{ \AA}$ 吻合得很好。结合 XRD, 推测该类析出相为 MgZn_2 。

经反复倾转和移动样品在 $B=[7\bar{2}\bar{5}3]_{\text{Mg}}$ (标定如图 6(d))时, 也发现有独立的析出相衍射斑点(g_3), 图 6(e)和(f)分别为析出相的明场相和暗场相($g=g_3$)。求得这个析出相衍射斑点所对应的晶面间距 $d_{g_3}=3.168 \text{ \AA}$ 。通过查询 PDF 卡片, 它们分别对应 MgZn_2 的晶面间距 $d_{(10\bar{1}2)}=3.089 \text{ \AA}$ 相符。同时, 根据有关报导^[13], Mg-5%Zn(质量分数)合金经固溶时效后, 形成的共格过渡相 MgZn' (HCP 结构)具有类似 MgZn_2 (Laves 相)的晶体结构, 呈细长的针状, 惯习面为 $\{1\bar{1}00\}_{\text{Mg}}$ 棱柱面, 轴线垂直于 $(0001)_{\text{Mg}}$ 。罗治平和张少卿^[16]及 LUO 等^[17]研究得到的 MgZn_2 也有类似的位向关系, 并认为这类共格过渡相 MgZn' 即为 MgZn_2 。这与本研究发现的 β_2' 相在形态和位向上极为相似。综合以上分析, 认为该类析出相 β_2' 为 MgZn_2 。

3 讨论

Mg-Zn 合金的铸造性能较差, 其凝固过程往往是非平衡的, 易发生非平衡共晶反应, 加入 Cu 能改善

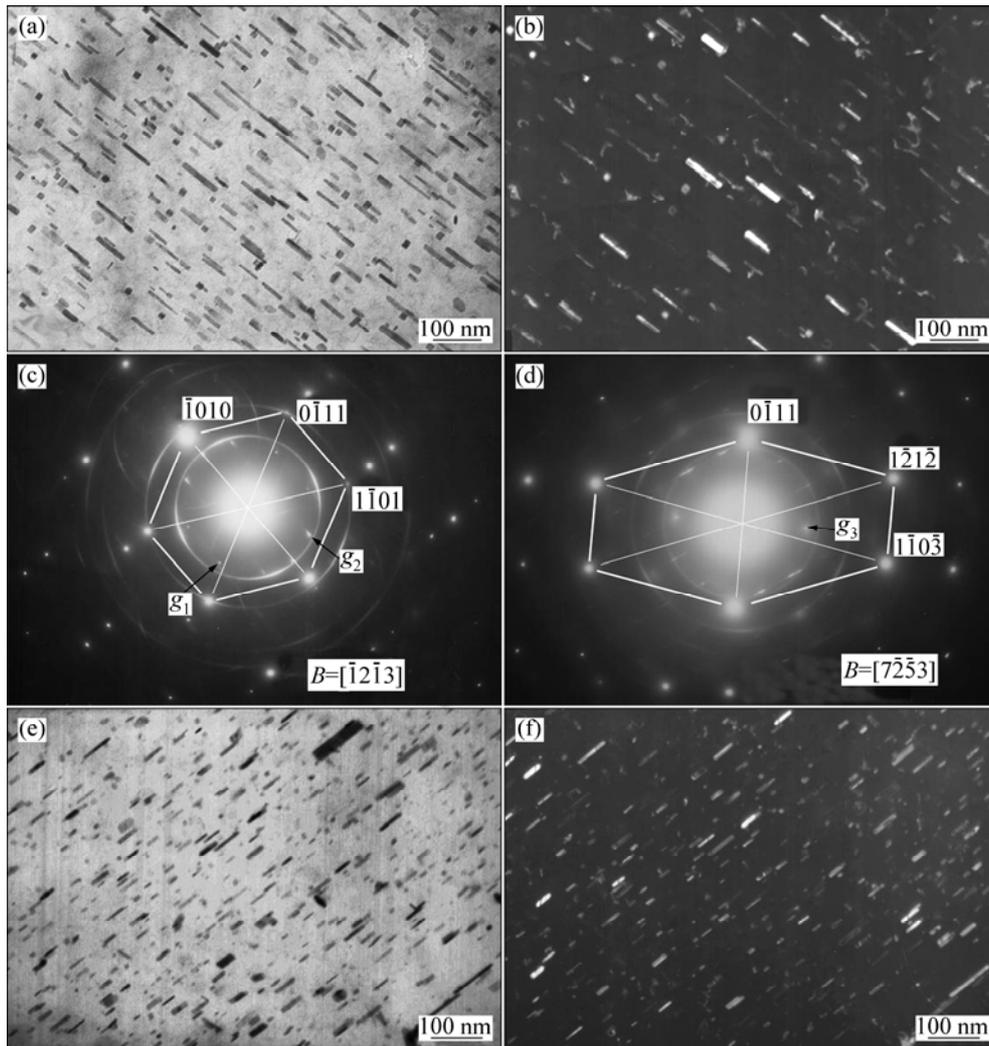


图6 析出相的明暗场像及电子衍射花样

Fig.6 TEM images and SADPs of precipitates in Mg-3Zn-1.5Cu-0.6Zr Mg alloy: (a) Bright field, $g=g_1$; (b) Dark field, $g=g_1$; (c) SADP of $[\bar{1}2\bar{1}3]_{\text{Mg}}$; (d) SADP of $[\bar{7}2\bar{5}3]_{\text{Mg}}$; (e) Bright field, $g=g_4$; (f) Dark Field, $g=g_4$

其流动性，但其凝固过程仍是非平衡的。特别是在砂型铸造条件下，由于成分过冷的影响，在先凝固的镁固溶体中，合金元素含量很低，而Cu和Zn的熔体主要分布于后凝固的非平衡共晶组织区域。综合前述的XRD、SEM与EDS分析，认为Zn和Cu主要分布于晶界与Mg形成非平衡共晶组织(Mg+Mg₂Cu+CuMgZn)。固溶后大部分非平衡共晶组织溶解，在时效过程中晶界基本无变化。

对合金中出现的其它几类析出相，尚未获得相应的衍射花样。但是根据文献[8, 10, 12, 14]，利用高分辨和微衍射研究，Mg-Zn系合金时效后析出棒状的 β_1' 相，其轴线垂直于 $\{0001\}_{\text{Mg}}$ ，是一种近似于Mg₄Zn₇的单斜结构，其晶格常数为 $a=2.596\text{ nm}$ ， $b=1.428\text{ nm}$ ， $c=1.524\text{ nm}$ ，与基体位向关系为 $[001] \parallel [0001]_{\text{Mg}}$ ，

$(630) \parallel (01\bar{1}0)_{\text{Mg}}$ 。这与本研究观察到的棒状 β_1' 在形态和位向上非常近似。推测本研究中的析出相 β_1' 为Mg₄Zn₇，需通过进一步的高分辨和微衍射对其进行表征。

根据XRD与TEM分析，析出相中存在MgZn，同时ZENG等^[18]对MgZn的报导也与本研究中观察到的 β 相在形态上相似，因此，认为这类相为MgZn，对应于图5(c)中的短杆状析出相。此外，根据从 $B=[2\bar{1}\bar{1}0]_{\text{Mg}}$ 观察到其横截面(见图5(a)中的点状相)，因此其轴线方向为 $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ 。

合金在180℃时效初期时效硬化效果明显，时效16 h时晶内析出大量的板条状和棱柱状的Mg-Zn二元相 β_2' ，在固溶强化和时效强化固溶作用下达到硬度峰值，再延长时效时间，晶内硬度随时效时间的延长而

硬度降低,即进入过时效阶段。原因是一方面合金元素大量以形成合金相形式析出,造成固溶强化效果的减弱;另一方面加上沉淀相粒子的长大,Orowan 强化机制效果减弱。关于 G.P.区、细小析出相与镁基体的界面共格程度和应变情况,则需要更进一步的高分辨率的电子显微学研究,判断其共格或失配细节。综合 TEM 分析,认为在时效过程中合金的主要强化作用来自于弥散分布的板条状和棱柱状的 β_2' -MgZn₂,它们的轴线都垂直于(0001)_{Mg},有利于阻挡位错在基面内的滑移。通过 XRD 分析(图 2)也可以看出在时效硬度峰值状态(180 , 16 h)时 MgZn₂ 的相对峰强度最高。

根据本研究的观察结果,推测 Mg-3Zn-1.5Cu-0.6Zr 镁合金时效析出顺序为:过饱和固溶体 棒状轴线垂直于(0001)_{Mg} 的 β_1' 相;板条状和棱柱状轴线垂直于(0001)_{Mg} 的 β_2' -MgZn₂;杆状轴线平行于(0001)_{Mg} 的 β -MgZn。

4 结论

1) 铸造 Mg-3Zn-1.5Cu-0.6Zr 镁合金晶界处共晶组织主要由 Mg+Mg₂Cu+CuMgZn 组成。

2) 经 440 , 24 h 固溶和 180 , 16 h 时效后合金中的析出相主要有三类:少量的棒状 β_1' (可能是 Mg₄Zn₇),轴线垂直于(0001)_{Mg},长度大约 50 nm;大量弥散分布、板条状和棱柱状的 β_2' -MgZn₂,轴线垂直于(0001)_{Mg},长度在 50~150 nm;极少数短杆状的 β -MgZn,轴线平行于(0001)_{Mg},长度约 20 nm。

3) 时效过程中合金的时效硬化效果主要来自于弥散分布的板条状和棱柱状 β_2' -MgZn₂。

REFERENCES

[1] CLARK J B, ZABFYR L, MOSER Z. Binary alloy phase diagrams[M]. Ohio: American Society for Metals, 1986: 1563-1566.

[2] STJOHN D H, QIAN M, EASTON M A, CAO P, HILDEBRAND Z. Grain refinement of magnesium alloys[J]. Metall Mater Trans A, 2005, 36(7): 1669-1679.

[3] LI Q, WANG Q D, WANG Y X, ZENG X Q, DING W J. Effect of Nd and Y addition on microstructure and mechanical properties of as-cast Mg-Zn-Zr alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2007, 427: 115-123.

[4] XU D K, TANG W N, LIU L, XU Y B, HAN E H. Effect of W-phase on the mechanical properties of as-cast Mg-Zn-Y-Zr alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2008, 461:

248-252.

- [5] YU K, LI W X, WANG R C. Mechanical properties and microstructure of as-cast and extruded Mg-(Ce, Nd)-Zn-Zr alloys[J]. Central South University of Technology, 2005, 12(5): 499-503.
- [6] ZHONG Y Y, WU Y P, XU S F, GUO T C, ZHANG X M. Creep mechanism of Mg-Nd-Zn-Zr alloy at ambient temperature[J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 2007, 17: s436-s439.
- [7] 李爱文,朱红梅,焦东玲,刘江文,罗承萍.合金化提高镁合金抗蠕变性能的研究进展[J].材料导报,2008,22(11):74-89. LI Ai-wen, ZHU Hong-mei, JIAO Dong-ling, LIU Jiang-wen, LUO Cheng-ping. Research progress in improvement in creep resistance of magnesium alloys by alloying[J]. Materials Review, 2008, 22(11): 74-89.
- [8] BUHA J, OHKUBO T. Natural aging in Mg-Zn(-Cu) alloys[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2008, 39(9): 2259-2273.
- [9] 李 箫,刘江文,罗承萍.铸态 ZC62 镁合金的时效行为[J].金属学报,2006,42(7):733-738. LI Xiao, LIU Jiang-wen, LUO Cheng-ping. Precipitation behavior of cast ZC62 magnesium alloy[J]. Acta Metall Sinca, 2006, 42(7): 733-738.
- [10] GAO X, NIE J F. Characterization of strengthening precipitate phases in a Mg-Zn alloy[J]. Scripta Mater, 2007, 56: 645-648.
- [11] BUHA J. Reduced temperature (22-100) ageing of an Mg-Zn alloy[J]. Mater Sci Eng A, 2008, 492(9): 11-19.
- [12] BUHA J. Characterisation of precipitates in an aged Mg-Zn-Ti alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2009, 472: 171-177.
- [13] CLARK J B. Transmission electron microscopy study of age hardening in a Mg-5%Zn alloy[J]. Acta Metall, 1965, 13: 1281-1289.
- [14] GAO X, NIE J F. Structure and thermal stability of primary intermetallic particles in an Mg-Zn casting alloy[J]. Scripta Mater, 2007, 57: 655-658.
- [15] KELLY A, NICHOLSON R B. Precipitation hardening[J]. Progr Mater Sci, 1963, 10(3): 151-170.
- [16] 罗治平,张少卿. Mg-Zr, Mg-Zn 及 Mg-Zn-Zr 合金的显微组织 [J]. 金属学报, 1993, 29(4): A176-A181. LUO Zhi-ping, ZHANG Shao-qin. Microstructures of Mg-Zr, Mg-Zn and Mg-Zn-Zr alloys[J]. Acta Metall Sin, 1993, 29(4): A176-A181.
- [17] LUO C P, LIU J W, LIU H W. Effects of Al/Zn ratio on the microstructure and strengthening of Mg-Al-Zn alloys[J]. Mater Sci Forum, 2005, 488/489: 205-209.
- [18] ZENG X Q, ZHANG Y, LU C, DING W J, WANG Y X, ZHU Y P. Precipitation behavior and mechanical properties of a Mg-Zn-Y-Zr alloy processed by thermo-mechanical treatment[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2005, 395: 213-219.

(编辑 李艳红)