

镁基准晶对 AM50 合金组织与性能的影响

马德志, 王 峰, 王 志, 刘 正, 毛萍莉

(沈阳工业大学, 辽宁 沈阳 110870)

摘 要: 通过普通凝固方法制备含高体积分数准晶相的 Mg-48Zn-13Y(MZY)准晶中间合金。利用 OM、SEM、EDS、XRD 及拉伸试验研究了 MZY 准晶对 AM50 合金显微组织及力学性能的影响。结果表明: 向 AM50 合金中添加 MZY 准晶后, 组织中可保留 $\text{Mg}_3\text{Zn}_6\text{Y}$ 准晶相, 并使合金组织得到明显地细化; 组织中 $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相的数量减少, 且形貌由粗大连续网状向断续条状及颗粒状转变。其中, 当 MZY 准晶加入量为 6%(质量分数)时, 合金组织最为细小, 合金的抗拉强度、屈服强度及伸长率达到峰值, 分别为 202.92 MPa、100.57 MPa 和 10.8%, 其比 AM50 合金分别提高了 24.59%、74.9%和 66.15%。外加 MZY 准晶改善 AM50 合金力学性能的原因可归结于组织细化、 $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相数量及形貌的改善, 以及与镁合金基体具有良好润湿性的准晶相的弥散强化作用。

关键词: 准晶增强; AM50 合金; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TG146.22

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2018)07-2166-06

镁合金是迄今工程应用中最轻的金属结构材料, 被广泛应用于汽车、航空和计算机等领域^[1,2]。Mg-Al-Mn (AM) 系合金由于具有较好的塑韧性、良好的铸造性能及较低的成本, 已被广泛应用在汽车方向盘骨架、座椅架和仪表板等部件上。但 AM 系合金的强度较低, 还不能满足一些汽车关键结构件的性能要求。然而, 自 Z. Luo 等^[3]首次在 Mg-Zn-Y 合金中发现稳定的二十面体准晶相 (I-Phase) 以来, 由于准晶相的低界面能、热力学稳定性以及其与镁合金基体的良好润湿性等特点, 使得近年来准晶增强镁合金的研究备受关注。镁合金中准晶相的获得一方面可通过向纯镁中加入一定比例的 RE 和 Zn 元素内生形成; 而另一方面是将事先制备的准晶颗粒加入到镁合金中形成。L. Yang 等^[4]发现压力铸造 Mg-45Zn-10Y 准晶增强 AZ91 合金组织由 $\alpha\text{-Mg}$ 、 $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 及 $\text{Mg}_3\text{Zn}_6\text{Y}$ 相组成。J. S. Zhang 等^[5-8]研究表明, 将 Mg-Zn-Y-Mn 准晶中间合金加入到 AZ91、ZA54、ZK60 和 ZA155 合金中可使准晶相很好的遗留在合金组织中, 并显著改善合金组织、提高合金的力学性能。X. D. Wang 等^[9]将 AZ31 粉末与 $\text{Mg}_3\text{Zn}_6\text{Gd}$ 准晶中间合金粉末混合, 利用往复挤压工艺制备出含有稳定的二十面体准晶颗粒的 AZ31 镁基复合材料, 当准晶加入量为 15% (质量分数) 时, 合金的抗拉强度和屈服强度可达到 372 MPa 和 334 MPa。李淑波等^[10]研究表明, 适量的

Mg-Zn-Gd 准晶颗粒加入到 AZ31 镁合金中后, 能够明显提高合金的硬度, 进而提高合金的耐磨性能。Z. W. Zhao 等^[11]研究表明, Mg-Zn-Nd 准晶中间合金加入到 AZ91 镁合金中后, 可显著改善合金组织, 并提高合金的抗腐蚀性能。

目前, 关于准晶增强镁合金的研究主要集中在 AZ 系列和 ZA 系列镁合金, 而对于准晶增强 AM50 镁合金的研究尚未见报道。故本工作以应用广泛的 AM50 合金为研究对象, 将 Mg-48Zn-13Y (质量分数, %) 准晶中间合金加入到 AM50 合金中, 研究镁基准晶对 AM50 合金组织性能的影响, 并分析其强韧化机理。

1 实 验

采用纯铈 (>99.9%) 和 Mg-25%Y (质量分数, 下同) 中间合金作为原料, 采用普通凝固方法制备出 Mg-48Zn-13Y 准晶中间合金。将商用 AM50 合金铸锭在坩埚电阻炉中 700 °C 下熔化, 然后将预热的 Mg-48Zn-13Y(MZY) 准晶中间合金加入到合金熔体中, 加入量分别为 2%、4%、6%和 8%(质量分数, 下同), 并在该温度下保温, 待合金全部熔化后搅拌扒渣, 浇注到预热温度为 200 °C 的金属型模具中成形。为防止熔体氧化, 实验中采用 0.5%SF₆(体积分数)和余量为 N₂ 的混合气体进行保护。

试样经打磨抛光后, 使用 4%的硝酸乙醇溶液进

收稿日期: 2017-07-20

基金项目: 国家自然科学基金 (51504153, 51571145); 辽宁省自然科学基金 (201602548)

作者简介: 马德志, 男, 1991 年生, 硕士生, 沈阳工业大学材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110870, E-mail: mdz0912@126.com

行腐蚀, 利用 BX60 型金相显微镜对试样进行显微组织观察, 在附带能谱分析仪 (EDS) 的日本 Hitachi S-3400N 型扫描电镜 (SEM) 上对试样的显微组织和不同相的微区成分进行观察和分析。利用 D/max III A 型的 X 射线衍射分析仪进行合金的物相分析。在 WDW-100 型电子万能试验机上进行室温拉伸力学性能试验, 拉伸速度为 3 mm/min, 每组合金选取 3 个试样进行测试。

2 结果与分析

2.1 Mg-48Zn-13Y 准晶中间合金

图 1 为 Mg-48Zn-13Y 准晶中间合金的 SEM 照片及 XRD 图谱。由图 1a 可知, 采用普通凝固方法制备的准晶中间合金组织中含有大量的单一花瓣、带花蕊的五花瓣及六花瓣状化合物。同时, 合金组织中还存在大量致密的层片状组织, 且其多以花瓣状组织为核心, 在其周边呈放射状生长, 而层片状组织间则被黑色物相所分开。对组织中黑色物相 (A)、花蕊 (B)、花瓣 (C) 及层片状组织 (D) 进行能谱分析, 其结果如表 1 所示。能谱分析结果表明: 花瓣及花蕊组织中 Mg、Zn、Y 3 种元素的原子比接近 3:6:1, 为 $\text{Mg}_3\text{Zn}_6\text{Y}$ 准晶相; 黑色物相为 $\alpha\text{-Mg}$; 而层片状组织的化学式为 $\text{Mg}_{70.53}\text{Zn}_{25.56}\text{Y}_{3.91}$ (原子分数, %), 其为 I-Phase+ $\alpha\text{-Mg}$ 共晶组织^[12,13]。XRD 结果也表明 (图 1b), Mg-48Zn-13Y 准晶中间合金主要由 $\alpha\text{-Mg}$ 相、 $\text{Mg}_3\text{Zn}_6\text{Y}$ 准晶相组成。

2.2 Mg-48Zn-13Y/AM50 合金显微组织

图 2 为 AM50 合金与 AM50+6%MZY 合金的 XRD 图谱。由图可知, AM50 合金主要由 $\alpha\text{-Mg}$ 和 $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 组成 (图 2a); 准晶中间合金加入到 AM50 合金中后, 合金主要由 $\alpha\text{-Mg}$ 、 $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 和 I- $\text{Mg}_3\text{Zn}_6\text{Y}$ 准晶相组成 (图 2b)。

图 3 为不同准晶加入量的 AM50 合金的光学显微组织。由图可以看出, AM50 合金的平均晶粒尺寸约为 150 μm , 呈明显的树枝晶形貌 (图 3a); 当 AM50 合金加入准晶后, 合金组织得到了明显地细化, 合金组织由粗大的树枝晶向细小的等轴晶转变。当 MZY 加入量为 6% 时, 合金的平均晶粒尺寸约为 50 μm , 组织最为细小均匀 (图 3d); 当加入量达到 8% 时, 合金组织有所粗化, 第二相发生局部偏聚现象 (图 3e)。

图 4 为不同准晶加入量的 AM50 合金 SEM 照片。由图可知, AM50 合金组织中除了 $\alpha\text{-Mg}$ 基体和粗大连续网状的 $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相外, 在 β 相周围还存在少量共晶组织及细小白亮的 Al_8Mn_5 相 (图 4a)。随着准晶加入量的增加, 组织中的 β 相形貌开始由粗大连续网状向断续条状及颗粒状转变, 尺寸减小且数量减少, β

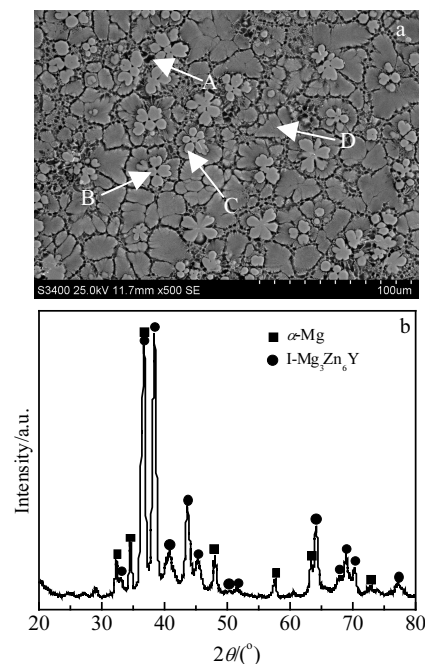


图 1 Mg-48Zn-13Y 准晶中间合金的 SEM 照片及 XRD 图谱
Fig.1 SEM image (a) and XRD pattern (b) of Mg-48Zn-13Y quasicrystal master alloy

表 1 图 1a 中 Mg-48Zn-13Y 合金中各相的 EDS 分析结果

Table 1 EDS analysis of Mg-48Zn-13Y alloy at different points in Fig.1a (at%)

Test points	Mg	Zn	Y
A	96.81	3.19	-
B	31.75	56.15	12.10
C	37.99	51.16	10.85
D	70.53	25.56	3.91

相周围共晶组织逐渐消失。当准晶中间合金加入量为 6% 时, β 相最为细小且分布均匀 (图 4d); 当加入量为 8% 时, 合金组织中 β 相开始由颗粒状向断续条状转变, 数量有增多的趋势 (图 4e)。此外, 在合金组织中还会出现一种白亮颗粒状及花瓣状化合物 (图 5a, 5c)。对其进行能谱分析, 结果表明 (图 5b, 5d), 合金组织中白亮颗粒状及花瓣状化合物中除了 Mg、Zn 和 Y 元素外, 还含有 Al 及 Mn 元素。Z. W. Zhao 及刘腾等人^[11,14]的研究表明, 向 AZ91 镁合金中加入 Mg-Zn-RE 准晶后, 组织中准晶相也含有一定量的 Al 和 Mn 元素。因此, 在本研究的合金组织中白亮颗粒状及花瓣状化合物应为准晶中间合金遗留在基体合金中的 $\text{Mg}_3\text{Zn}_6\text{Y}$ 准晶相, 这也进一步验证了合金组织中准晶相的存在。而对于准晶相中为何含有 Al 和 Mn 元素, 还有待进一步研究。

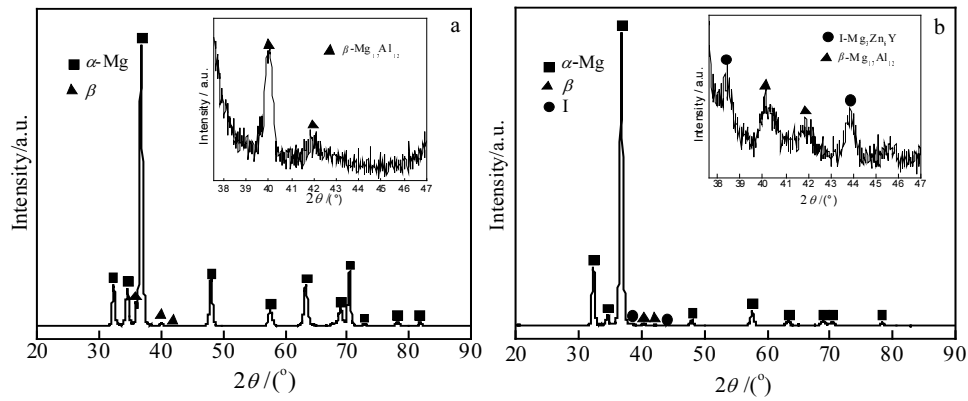


图 2 AM50 合金与 AM50+6%MZY 合金的 XRD 图谱

Fig.2 XRD patterns of AM50 (a) and AM50+6%MZY (b) alloys

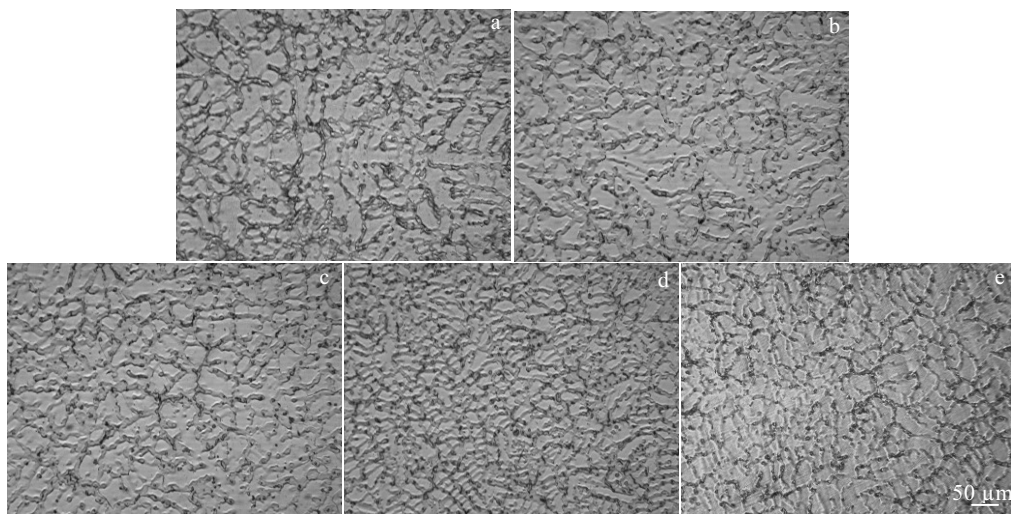


图 3 不同准晶加入量的 AM50 合金的光学显微组织

Fig.3 Optical microstructures of AM50 alloy with different MZY additions: (a) AM50, (b) AM50+2%MZY, (c) AM50+4%MZY, (d) AM50+6%MZY, and (e) AM50+8%MZY

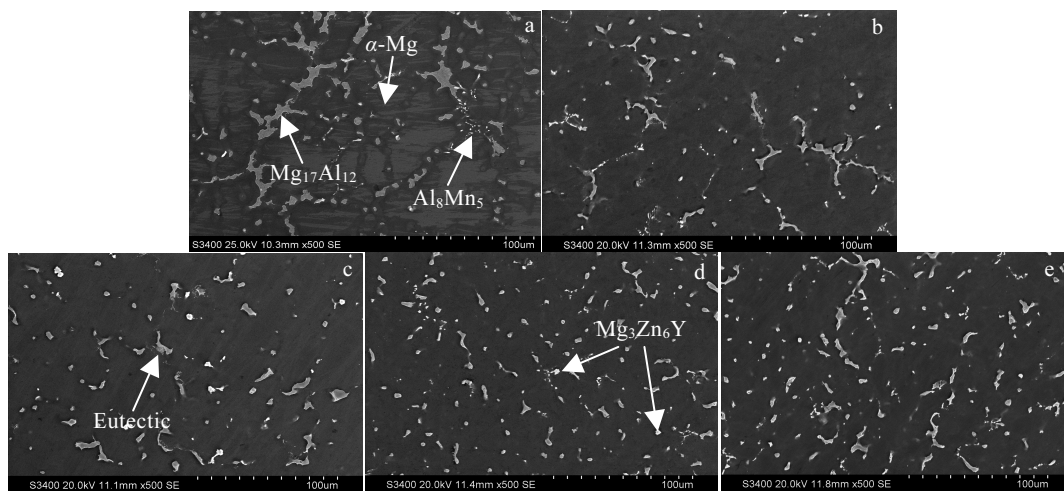


图 4 不同准晶加入量的 AM50 合金的 SEM 照片

Fig.4 SEM images of AM50 alloy with different MZY additions: (a) AM50, (b) AM50+2%MZY, (c) AM50+4%MZY, (d) AM50+6%MZY, and (e) AM50+8%MZY

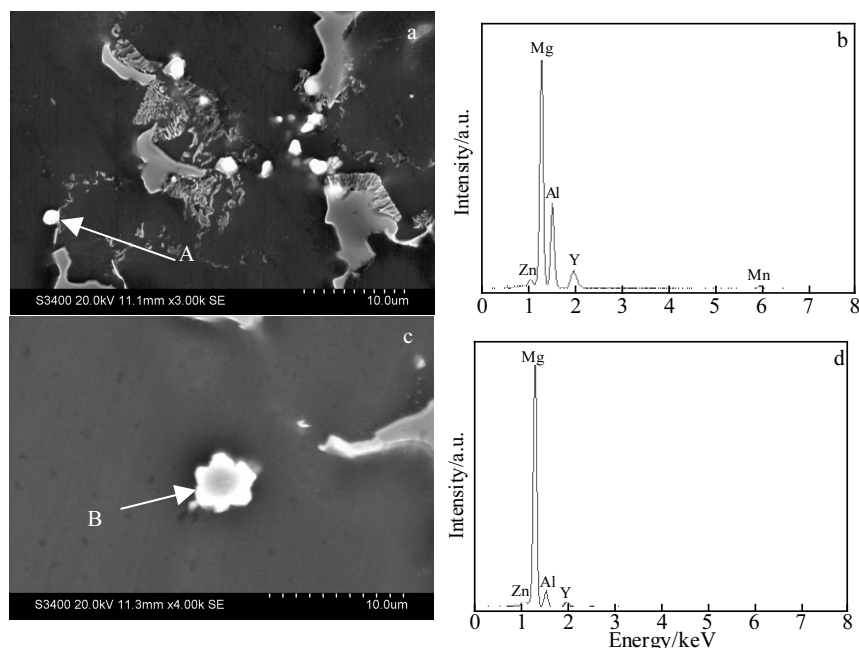


图5 不同准晶加入量的 AM50 合金的 SEM 照片及 EDS 能谱分析

Fig.5 SEM images (a, c) and EDS spectra (b, d) of AM50 alloy with different MZY additions: (a) AM50+2%MZY, (b) EDS spectrum of point A in Fig.5a, (c) AM50+6%MZY, and (d) EDS spectrum of point B in Fig.5c

准晶相颗粒均匀地分布在基体中或晶界第二相的附近,在合金凝固过程中稳定的准晶颗粒聚集在生长界面前沿,可以阻碍 Al 原子在凝固过程中的扩散,从而抑制 α -Mg 基体及 β 相的生长,细化合金组织^[11]。但是,作为形核核心的增强相对合金的细化作用存在一个最佳临界值,若形核核心小于临界值,则晶粒细化效果不明显;若形核核心大于临界值,则形核核心会聚集成团,丧失细化作用,最终造成合金组织粗化^[8]。

2.3 Mg-48Zn-13Y/AM50 合金力学性能及断口分析

图 6 为不同准晶加入量的 AM50 合金的室温拉伸应力-应变曲线。可见,随着准晶加入量的增加,合金的室温力学性能呈现先增加后减小的趋势。当加入量为 6% 时,合金的各项力学性能达到最大值,抗拉强度、屈服强度和伸长率分别为 202.92 MPa、100.57 MPa 和 10.8%,其与未添加准晶的 AM50 合金相比分别提高了 24.59%, 74.9% 和 66.15%。但向 AM50 合金中添加过多的准晶会降低合金的力学性能。上述结果表明,添加适量的 Mg-48Zn-13Y 准晶可以显著提高 AM50 合金的室温强度,并改善合金的塑性。

图 7 为 AM50 合金和准晶加入量为 6% 的 AM50 合金的断口形貌 SEM 照片。可以看出,AM50 合金的断口具有典型的解理断裂特征,断口上存在较粗大撕裂棱和解理面(图 7a),而在 AM50+6%MZY 合金的

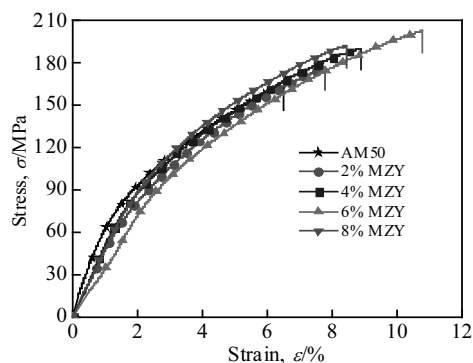


图6 不同准晶加入量的 AM50 合金的室温拉伸应力-应变曲线
Fig.6 Tensile stress and strain curves of AM50 alloy with different MZY additions at room temperature

断口表面解理面数量明显增多且比较细小,无大的撕裂棱,具有明显的河流状花样,且局部伴有小而深的韧窝(图 7b),这表明,准晶的加入能够很好的改善 AM50 合金的塑性。

2.4 Mg-48Zn-13Y/AM50 合金强化机理

添加准晶能够明显改善 AM50 合金的力学性能,其强化机理可归结为以下 3 个方面:

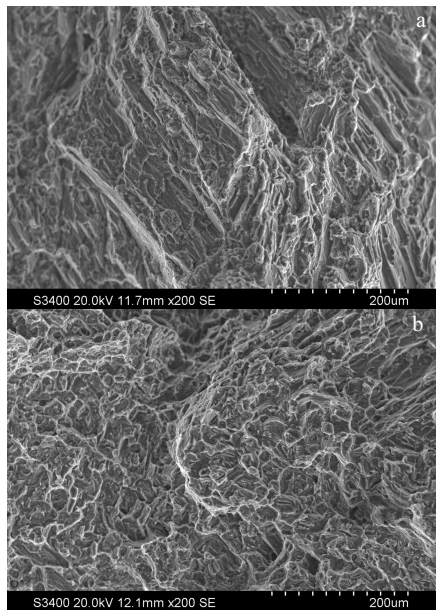


图 7 AM50 和准晶加入量为 6% 的 AM50 合金的拉伸断口 SEM 照片

Fig.7 Tensile fracture SEM images of AM50 (a) and AM50+6%MZY (b) alloys

首先, 细晶强化作用: 如前所述, 在合金凝固过程中, $\text{Mg}_3\text{Zn}_6\text{Y}$ 准晶相聚集在生长界面前沿, 抑制 $\alpha\text{-Mg}$ 的生长, 从而细化合金组织。根据 Hall-Petch 公式^[15]: $\sigma_y = \sigma_0 + kd^{-1/2}$, 可知, 合金的屈服强度和晶粒直径的平方成反比。因此, 晶粒细化有助于提高合金的强度。此外, 合金晶粒得到细化后, 即在一定体积内晶粒数目增加, 在同样的变形量下, 变形分散在更多的晶粒上进行, 变形的不均匀性便越小, 变形引起的应力集中也就越小, 故合金的塑性也会得到一定程度地提高^[16]。

其次, 弥散强化作用: 由于 $\text{Mg}_3\text{Zn}_6\text{Y}$ 准晶相熔点为 648 °C, 具有一定的高温稳定性^[14,17], 所以在 700 °C 下将准晶中间合金加入到合金熔体中, 准晶相依然能够很好地保留在基体合金中。准晶相的低界面能、热力学稳定性以及其与镁合金基体的良好润湿性等特点, 使得准晶相与镁合金基体具有较高的结合强度^[6]。弥散分布的准晶颗粒能够稳定的钉扎晶界, 阻碍位错运动, 从而起到弥散强化的作用。

最后, β 相数量及形貌的改善: 由于 AM50 合金中 $\alpha\text{-Mg}$ 基体为 hcp 结构, $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相为 bcc 结构, 因此, 这导致 $\alpha\text{-Mg}$ 基体与 β 相界面变得脆弱, 而且 β 相本身较软, 强度较低, 微裂纹易在 $\text{Mg}/\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相界面处形成^[18]。而准晶中间合金加入到 AM50 合金中后, $\text{Mg}_3\text{Zn}_6\text{Y}$ 准晶相将阻碍 Al 原子在凝固过程中的扩散,

从而抑制 β 相的生长, 导致 β 相数量减少, 尺寸减小, 分布更加均匀, 这使得微裂纹不易于在 $\text{Mg}/\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相界面处形成, 有助于提高合金的强韧性。

3 结 论

1) 向 AM50 合金中加入 Mg-48Zn-13Y 准晶后, $\text{Mg}_3\text{Zn}_6\text{Y}$ 准晶相能够遗留在组织中, 组织得到细化, 并使 $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相由粗大连续网状向断续条状及颗粒状转变, 尺寸减小, 数量减少, 且分布更加均匀。

2) 当准晶加入量为 6% 时, 合金组织最为细小, 合金的抗拉强度、屈服强度和伸长率达到峰值, 分别为 202.92 MPa、100.57 MPa 和 10.8%, 其比 AM50 合金分别提高了 24.59%、74.9% 和 66.15%。

3) 外加 MZY 准晶改善 AM50 合金力学性能的原因可归结于细晶强化、准晶的弥散强化, 以及 β 相形貌数量改善的综合作用所致。

参考文献 References

- [1] Agnew S R, Nie J F. *Scripta Mater*[J], 2010, 63(7): 671
- [2] Easton M, Beer A, Barnett M *et al.* *JOM*[J], 2008, 60(11): 57
- [3] Luo Z, Zhang S, Tang Y *et al.* *Scr Metall Mater*[J], 1993, 28(12): 1513
- [4] Yang L, Hou H, Zhao Y H *et al.* *Trans Nonferrous Met Soc China*[J], 2015, 25(12): 3936
- [5] Zhang J S, Pei L X, Du H W *et al.* *J Alloy Compd*[J], 2008, 453(1-2): 309
- [6] Zhang J S, Zhang Y Q, Zhang Y *et al.* *Trans Nonferrous Met Soc China*[J], 2010, 20(7): 1199
- [7] Zhang J S, Liu Y L, Zhang Y *et al.* *China Foundry*[J], 2010, 7(2): 117
- [8] Zang J S, Wang X, Zhang Z G *et al.* *China Foundry*[J], 2011, 8(3): 305
- [9] Wang X D, Du W B, Wang Z H *et al.* *Mater Sci Eng A*[J], 2011, 530: 446
- [10] Li Shubo(李淑波), Wu Hairong(吴海荣), Wang Zhaohui(王朝辉) *et al.* *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2016, 26(4): 732
- [11] Zhao Z W, Teng X Y, Zhou G R *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2014, 43(4): 791
- [12] Yang Ling(杨 玲), Zhao Yuhong(赵宇宏), Hou Hua(侯 华) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2014, 43(7): 1754
- [13] Yi S, Park E S, Ok J B *et al.* *Mater Sci Eng A*[J], 2001, 300(1-2): 312
- [14] Liu Teng(刘 腾), Teng Xinying(滕新营), Liu Liyan(刘立艳)

- et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2012, 41(S2): 28
- [15] Yuan W, Panigrahi S K, Su J Q *et al. Scr Mater*[J], 2011, 65: 994
- [16] Wang Feng(王 峰), Sun Shijie(孙士杰), Mao Pingli(毛萍莉) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2015, 44(7): 1668
- [17] Wan Diqing(万迪庆), Yang Gencang(杨根仓), Liu Yajuan(刘雅娟) *et al. Foundry*(铸造)[J], 2006, 55(1): 9
- [18] Lü Y Z, Wang Q D, Ding W J *et al. Mater Lett*[J], 2000, 44(5): 265

Effect of Mg-Based Quasicrystals Addition on Microstructure and Mechanical Properties of AM50 Magnesium Alloy

Ma Dezhi, Wang Feng, Wang Zhi, Liu Zheng, Mao Pingli
(Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: The Mg-48Zn-13Y (MZY) quasicrystal master alloy with high volume fraction of the quasicrystalline phase was prepared by a conventional solidification method. The influences of the MZY quasicrystal on microstructures and mechanical properties of AM50 alloys were investigated by OM, SEM, EDS, XRD and tensile tests. The results indicate that with addition of the MZY quasicrystal to AM50 alloy, the $\text{Mg}_3\text{Zn}_6\text{Y}$ quasicrystal phase can be retained in AM50 matrix alloy, and the microstructures are obviously refined. The β phase in the microstructures is changed from coarse and continuous net-like to discontinuous strip-like and granular, and the amount is decreased. When the content of the MZY quasicrystal is 6%, the microstructure is greatly refined, and the ultimate tensile strength, yield strength and elongation of the alloy reach to the maximum, 202.92 MPa, 100.57 MPa and 10.8%, respectively, which are improved by 24.59%, 74.9% and 66.15%, respectively, compared with those of AM50 alloy. Mechanical properties of AM50 magnesium alloy can be improved significantly by addition of the MZY quasicrystal, which results from the microstructure refinement, the optimization of the morphology and amount of the β phase, and the dispersion strengthening effect of the quasicrystal phase having good wettability with the magnesium alloy substrate.

Key words: quasicrystal strengthening; AM50 alloy; microstructure; mechanical properties

Corresponding author: Wang Feng, Ph. D., Associate Professor, School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, P. R. China, Tel: 0086-24-25496616, E-mail: wf9709@126.com