

高强高韧 Mg-8.5Gd-2.0Y-1.0Ag-0.4Zr 合金的组织与性能^①

陈 杰^{②*} 王渠东^{③***} 赵 政* 丁文江^{***}

(* 上海交通大学轻合金精密成型国家工程研究中心 上海 200240)

(** 上海交通大学金属基复合材料国家重点实验室 上海 200240)

摘 要 研究了高强高韧 Mg-8.5Gd-2.0Y-1.0Ag-0.4Zr (wt. %) 合金的显微组织和力学性能。结果表明,该合金铸态组织细小,主要由 α -Mg 固溶体、晶界析出相 Mg₅(GdY) 以及分布在晶粒内部的 Zr 核组成;T4 态时晶界析出相基本完全消失,但出现了一些方块相 γ ;合金具有明显的时效硬化效果,且随着时效温度的提高,合金的峰值时效硬度下降,峰值时间相应缩短。经 200℃ 峰值时效处理后表现出极为优异的室温力学性能,抗拉强度(UTS)和延伸率分别达到 396MPa 和 9.1%,显著的时效强化是该合金具有优异力学性能的主要原因。如此优异的强度和塑性在常规铸造镁合金中是极为罕见的,对于推广镁合金的应用具有重要意义。

关键词 镁合金,显微组织,力学性能,时效强化,Mg-Gd-Y-Ag-Zr 合金

0 引 言

镁合金具有密度低、比强度高、抗阻尼性和成型性优良等特性,是目前应用的最轻的金属结构材料,在汽车、电子信息、军工和航空航天等领域都有着广泛的应用^[1]。然而,相对较低的强度和室温塑性大大限制了镁合金的高端应用和推广。近年来,高强度镁合金的开发取得了很大进展^[2,4],其中 Mg-Gd-Y 系镁合金具有优异的力学性能以及比商用 WE54 镁合金更优异的抗蠕变性,应用前景最为广阔^[5,6],但其力学性能相对于铝合金等轻金属仍有待进一步提高。微量合金化是进一步提高镁合金力学性能的有效手段之一,有报道称添加 Ag 元素可以改善 Mg-Nd 合金的拉伸性能^[7],同时还可以显著增强 Mg-Y-Zn^[8]和 Mg-Gd^[9]合金的时效硬化效果。通过在 Mg-Gd-Zr 系中添加 Ag 元素获得的 Mg-18.2Gd-1.9Ag-0.34Zr(wt. %) 是到目前为止报道中室温强度最高的常规铸造镁合金,其室温抗拉强度达到了 414MPa,但是由于过高的 Gd 含量导致其室温延伸率只有 2%^[10]。因此进一步开发高强度并且塑性优良的镁合金具有重要意义。

本文研究了 Mg-8.5Gd-2.0Y-1.0Ag-0.4Zr (wt. %) 合金的显微组织和室温力学性能,发现经 200℃ 峰值

时效后合金表现出极为优异的室温强度和塑性,抗拉强度和延伸率分别达到了 396MPa 和 9.1%,这在常规铸造镁合金中是极为罕见的,对推广镁合金的应用具有极为重要的意义。

1 实验

本研究的合金成分为 Mg-8.5Gd-2.0Y-1.0Ag-0.4Zr(wt. %)。采用纯镁、纯银以及 Mg-25wt. % Gd、Mg-25wt. % Y 和 Mg-30wt. % Zr 中间合金作为原料配制合金在井式坩埚电阻炉中采用体积分数为 0.5% 的 SF₆ + CO₂ 混合气体保护熔炼,采用金属型铸造,模具预热温度为 200℃。铸锭的固溶处理工艺为 490℃ × 10h 后冷水 (~ 20℃) 淬火。时效处理在 200℃ 和 225℃ 的油浴炉中进行。采用光学显微镜(OM)和 JSM6460 扫描电子显微镜(SEM) 观察合金的显微组织。采用 X 射线衍射仪分析合金的相组成,实验电压 40kV,工作电流 200mA,采用 Cu 靶,扫描速度为 4°/min。维氏硬度测定选用的载荷是 5kg,加载时间为 15s。室温拉伸试验在 Zwick/Roell-20kN 材料测试机上进行,采用矩形片状拉伸试样,标距尺寸为 15mm × 3.5mm × 2mm,拉伸速率为 0.5mm/min。文中合金的硬度和力学性能数据均为 5 次测量的平均值。

① 国家自然科学基金(No. 50674067),973 计划(No. 61330)资助项目。

② 男,1985 年生,硕士;研究方向:镁合金及其成形技术;E-mail: jaychen1101@sjtu.edu.cn

③ 通讯作者, E-mail: wangqdong@sjtu.edu.cn

(收稿日期:2009-04-17)

2 结果与讨论

2.1 显微组织和时效特征

图 1 为 Mg-8.5Gd-2.0Y-1.0Ag-0.4Zr 合金原始铸态显微组织 SEM 照片和 X 射线衍射(XRD)分析结果。可以看出,合金铸态组织细小,平均晶粒尺寸大约为 $35\mu\text{m}$,显微组织主要由 $\alpha\text{-Mg}$ 固溶体基体,沿晶界不连续分布的晶界析出相以及分布在晶粒内部的 Zr 核 A 组成,同时在晶界析出物周围我们还可以观察到一些须状组织 B。从图 1(c)中的 XRD 分析

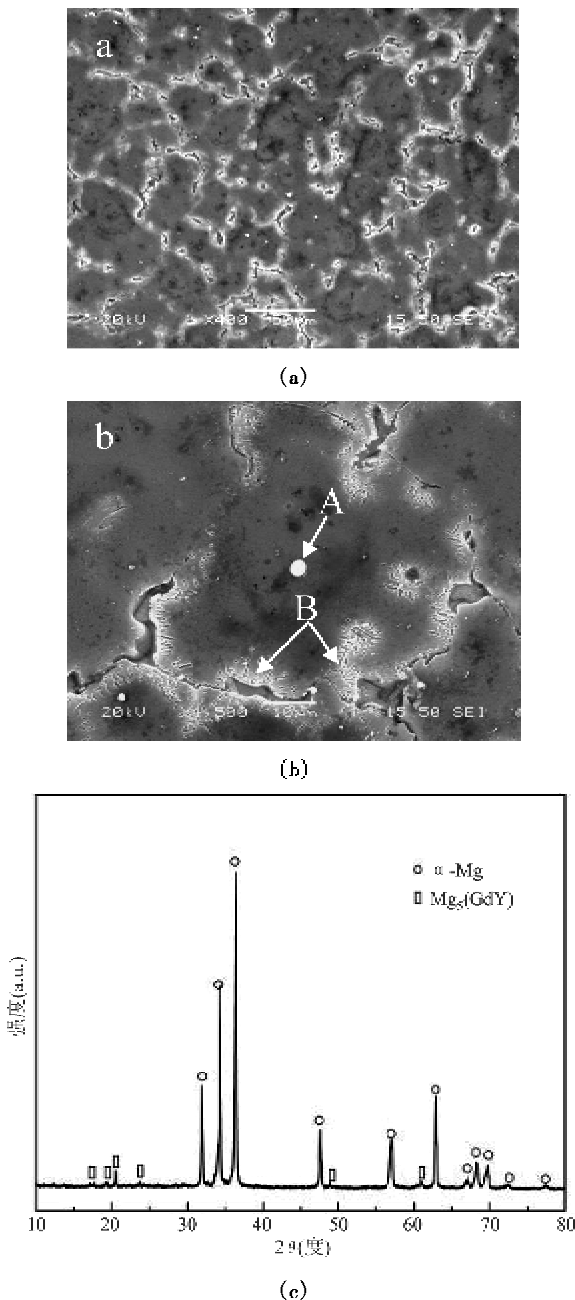


图 1 Mg-8.5Gd-2.0Y-1.0Ag-0.4Zr 合金原始铸态 SEM 形貌(a)和(b)及 XRD 分析结果(c)

结果来看,合金原始铸态也主要由 $\alpha\text{-Mg}$ 、 $\text{Mg}_5(\text{GdY})$ 两种相组成。

图 2 是 Mg-8.5Gd-2.0Y-1.0Ag-0.4Zr 合金 T4 态的显微组织 SEM 照片,经过 $490^\circ\text{C} \times 10\text{h}$ 的固溶处理后,晶粒有所长大,平均晶粒尺寸大约为 $43\mu\text{m}$,晶界析出相基本完全溶入基体。同时在晶界和晶界附近出现了一些块状相。图 2(b)中的 XRD 分析结果也显示经过固溶处理后原有晶界析出相 $\text{Mg}_5(\text{GdY})$ 的衍射峰消失,除了 $\alpha\text{-Mg}$ 的衍射峰以外,其余小峰与方块相的衍射峰匹配并标定为 γ 相^[11],这都与显微组织的观察结果非常吻合。

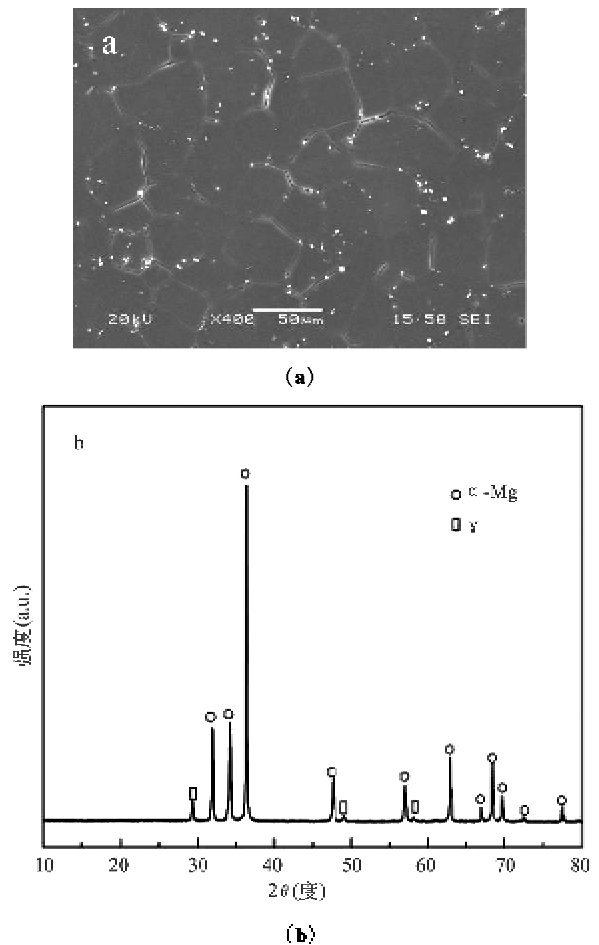


图 2 Mg-8.5Gd-2.0Y-1.0Ag-0.4Zr 合金 cast-T4 态 SEM 形貌(a)及 XRD 分析结果(b)

图 3 是 T4 态 Mg-8.5Gd-2.0Y-1.0Ag-0.4Zr 合金在 200°C 和 225°C 下的等温时效曲线。 200°C 时效初始阶段的孕育期较长,大约 4h 后合金硬度才开始快速上升,并在 40h 时达到峰值,峰值硬度为 117VH。时效温度提高到 225°C 后,时效孕育期缩短为大约 2h,合金硬度在 12h 即达到峰值,约为 111VH。总体来看,合金表现出显著的时效硬化反应,同时随着时效温度的升高,合金的时效峰值硬度呈下降趋势,而

初始的时效孕育期和峰值时间也相应缩短。

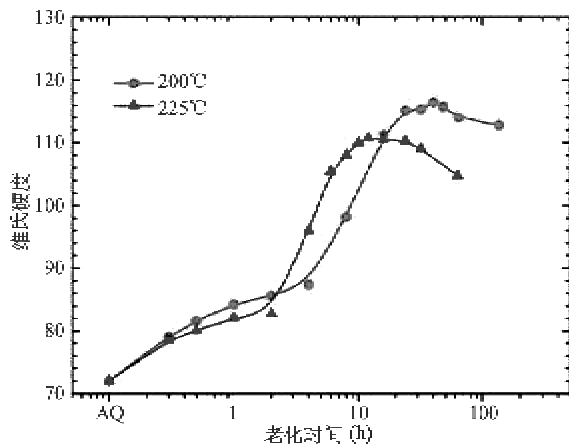


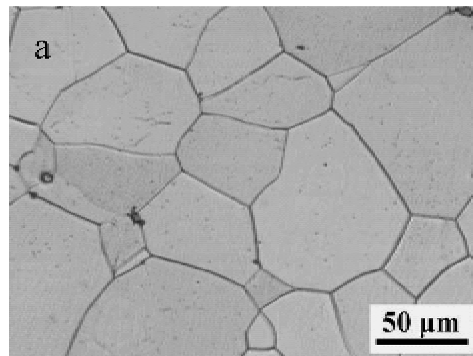
图3 Mg-8.5Gd-2.0Y-1.0Ag-0.4Zr cast-T4 合金等温时效曲线

图4是 Mg-8.5Gd-2.0Y-1.0Ag-0.4Zr 合金 T6 态下的光学显微组织及 XRD 分析结果。经过时效处理后,合金晶粒基本没有长大,显微组织也与 T4 态合金相差不大,但在晶粒内部可以观察到析出相小麻点。从光学形貌来看,时效温度对合金组织形貌的影响不大。XRD 分析结果表明 T6 态也主要是 α -Mg 和方块相,未能检测出时效析出相的衍射峰,同时不同温度时效处理的试样 XRD 分析的衍射峰也没有发现明显的差异。

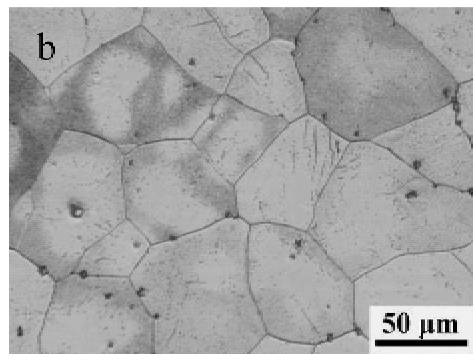
2.2 室温和力学性能

图5列出了 Mg-8.5Gd-2.0Y-1.0Ag-0.4Zr 合金不同状态下的室温和力学性能。在铸态条件下,合金的屈服强度 (TYS)、极限抗拉强度 (ultimate tensile strength, UTS) 和延伸率分别为 144MPa、249MPa 和 8.8%。经过固溶处理 (T4) 后,抗拉强度比铸态提高了 ~ 22 MPa,延伸率则大幅提高了近 2 倍,达到 21.6%,而屈服强度略有下降。经过时效处理 (T6) 后,合金的屈服强度和抗拉强度都得到了显著提高,但延伸率急剧下降,200℃峰值时效合金具有超高强度和优异塑性的最佳力学性能组合,屈服强度、抗拉强度和延伸率分别达到了 234MPa、396MPa 和 9.1%。不同时效处理工艺也对性能产生了一定影响,主要体现为 225℃峰值时效样品的 TYS 和 UTS 均稍低于 200℃峰值时效样品,但延伸率更好,达到 11.4%。

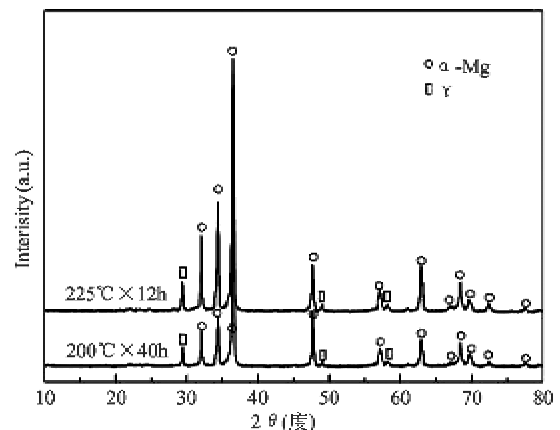
从时效曲线和拉伸试验结果可以看出,显著的时效强化是该合金超高强度的主要原因,这也是 Mg-Gd-Y 合金体系的特性,而 Ag 元素对合金的时效硬化具有显著促进作用,进一步提高了合金的力学性能。关于 Ag 对合金时效强化促进作用的机理,



(a)



(b)



(c)

图4 Mg-8.5Gd-2.0Y-1.0Ag-0.4Zr 合金 cast-T6 态光学形貌 (a) 200℃ × 40h, (b) 225℃ × 12h 及 (c) XRD 分析结果

Nie 等^[8,9]在研究 Ag 元素对 Mg-Gd 和 Mg-Y-Zn 合金时效硬化的促进作用后,指出合金基面上的细小片状析出相数量显著增加并且分布更加细密,是合金的时效硬化效果显著提高的原因。此外,Ag 还被认为可以增大时效析出相之间的单位体积自由能,能促进时效过程中析出相的形核,有利于析出相的弥散分布;同时 Ag 与空位的结合能较大,从而优先与空位结合,影响合金元素通过空位进行扩散的途径,从而阻碍了析出相的长大,有利于析出相的细化^[12]。Mendis 等也发现 Ag 可以细化 Mg-Zn 合金的时效析出相^[13]。因此,可以认为 Ag 元素对时效强

化的促进以及时效析出相的细化作用,使得合金强度提高的同时,塑性也得到了明显的改善。尽管要更好地理解该合金的强化机制仍需要对析出相进行更深入的表征和分析,但不可否认的是,本研究通过 Ag 元素的微合金化成功开发出具有如此优异强度和塑性的常规铸造镁合金,是高性能镁合金开发的一个重要突破,对进一步提高镁合金性能并促进其应用具有重要意义。

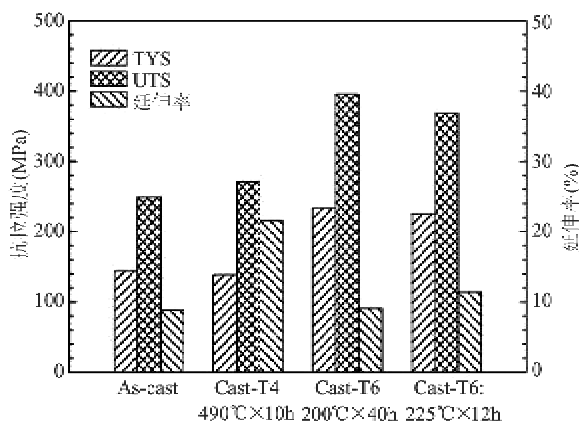


图 5 Mg-8.5Gd-2.0Y-1.0Ag-0.4Zr 合金不同状态下室温力学性能

3 结论

(1) Mg-8.5Gd-2.0Y-1.0Ag-0.4Zr (wt. %) 合金铸态组织主要由 α -Mg 固溶体,沿晶界不连续分布的晶界析出相 $Mg_5(GdY)$ 以及分布在晶粒内部的 Zr 核组成;T4 态时晶界析出相基本完全消失,同时出现了一些方块相 γ 。

(2) Mg-8.5Gd-2.0Y-1.0Ag-0.4Zr (wt. %) 合金表现出显著的时效硬化效果,并且随着时效温度的升

高合金的时效峰值硬度呈下降趋势,而初始的时效孕育期和峰值时间也相应缩短。

(3) Mg-8.5Gd-2.0Y-1.0Ag-0.4Zr (wt. %) 合金经 200°C 峰值时效处理后表现出极为优异的室温力学性能组合,屈服强度、抗拉强度和延伸率分别达到 234MPa、396MPa 和 9.1%,显著的时效强化是优异力学性能的主要原因。

参考文献

- [1] Polmear I J. Magnesium alloys and applications. *Mater Sci Technol*, 1994, 10(1): 1-16
- [2] Unsworth W. Developments in magnesium alloys for casting applications. *Mater*, 1988, 4(2): 83-86
- [3] Luo A, Pekguleryuz M O. Cast magnesium alloys for elevated temperature applications. *J Mater Sci*, 1994, 29(20): 5259-5271
- [4] Rokhlina L L, Nikitina N I. Magnesium-gadolinium and magnesium-gadolinium-yttrium alloys. *Z Metallkd*, 1994, 85(12): 819-823
- [5] Anthony I, Kamado S, Kojima Y. Aging characteristics and high temperature tensile properties of Mg-Gd-Y-Zr alloys. *Mater Trans*, 2001, 42 (7): 1205-1211
- [6] Anthony I, Kamado S, Kojima Y. Creep properties of Mg-Gd-Y-Zr alloys. *Mater Trans*, 2001, 42 (7): 1212-1218
- [7] Payne R J M, Bailey N. Improvement of the age hardening properties of magnesium-rare earth alloys by addition of silver. *J Inst Metals*, 1960, 88: 417-427
- [8] Zhu Y M, Morton A J, Nie J F. Improvement in the age-hardening response of Mg-Y-Zn alloys by Ag additions. *Scripta Mater*, 2008, 58: 525-528
- [9] Gao X, Nie J F. Enhanced precipitation-hardening in Mg-Gd alloys containing Ag and Zn. *Scripta Mater*, 2008, 58: 619-622
- [10] Hoshikawa H, Maki S, Kamado S, et al. Realization of excellent mechanical properties in Mg-Gd-Ag-Zr and Mg-Gd-Cu-Zn-Zr casting alloys containing LPSO structure. In: Proceedings of the 2nd Asian Symposium on Magnesium Alloys, Fukuoka International Congress Center, Fukuoka, Japan, 2007. 136-137
- [11] 何上明. Mg-Gd-Y-Zr(-Ca)合金的微观组织演变、性能和断裂行为研究:[博士学位论文]. 上海:上海交通大学材料科学与工程学院, 2007. 55
- [12] 白聿钦, 赵丕峰, 赵文波. Ag 对 Mg-Al-Zn 系镁合金显微组织和力学性能的影响. *铸造*, 2003, 52 (2): 98-100
- [13] Mendis C L, Oh-ishi K, Hono K. Enhanced age hardening in a Mg 2.4 at. % Zn alloy by trace additions of Ag and Ca. *Scripta Mater*, 2007, 57: 485-488

Microstructure and mechanical properties of Mg-8.5Gd-2.0Y-1.0Ag-0.4Zr alloy with high strength and ductility

Chen Jie*, Wang Qudong**, Zhao Zheng*, Ding Wenjiang**

(* National Engineering Research Center of Light Alloy Net Forming, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240)

(** Key State Laboratory of Metal Matrix Composite, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240)

Abstract

The microstructure and mechanical properties of Mg-8.5Gd-2.0Y-1.0Ag-0.4Zr (wt. %) were investigated. The results show that this ascast alloy has fine microstructure and consists of α -Mg solid solution, grain boundary precipitates $Mg_5(GdY)$, and intracrystalline zirconium-rich cores. After solution treatment, the grain boundary precipitates almost disappear completely and some cubic shaped γ compounds are observed. The alloy shows remarkable age hardening response, and the age hardness, as well as the time to peak decrease with the increasing age temperature. After peak-aged at 200°C, the alloy exhibits very attractive mechanical properties, whose ultimate tensile strength (UTS) and elongation reach 396MPa and 9.1% respectively at room temperature, with the remarkable precipitation strengthening being the major contributor to its excellent mechanical properties. Such excellent combination of strength and ductility is peculiar for ordinary casting Mg alloys, and would be of great significance for the extensive applications of Mg alloys.

Key words: magnesium alloys, microstructure, mechanical properties, precipitation strengthening, Mg-Gd-Y-Ag-Zr alloys