

文章编号: 1005-2712(2008)03-0029-03

# Mg-Gd-Y-Zr 镁合金时效硬化研究

方 玲, 张小联, 谭爱花, 杨少铭

(赣南师范学院 化学与生命科学学院 江西省镁合金工程技术研究中心, 江西 赣州 341000)

**摘 要:** 通过对 Mg-Gd-Y-Zr 合金进行充分固溶, 并在不同温度下进行时效实验, 研究了该合金在时效过程中的微观组织及硬度的变化。结果表明, 充分固溶处理后, Gd、Y 元素在合金晶界处的偏析基本消除, 200 °C 时效时, 合金硬度随时效时间的延长而提高, 出现小峰值, 随后继续增长, 达到峰值后, 硬度缓慢下降, 逐渐趋于平稳; 时效温度越高, 合金时效动力越大, 达到峰值硬度所需的时间越短, 峰值硬度越小。

**关键词:** Mg-Gd-Y-Zr; 时效硬化; 硬度; 微观组织

**中图分类号:** TG146.2

**文献标识码:** A

## 0 引言

近十几年来, 航空、航天以及汽车工业对高强、耐热、抗蠕变镁合金产生了兴趣<sup>[1-3]</sup>。耐热镁合金的研究与开发引起了广泛的关注。在所有合金元素中, 稀土是提高镁合金耐热性能最有效最直接的合金元素<sup>[4-5]</sup>。添加稀土元素 Gd、Y 的 Mg-Gd-Y-Zr 合金中均匀弥散地析出热稳定性高的析出相是提高镁合金的室温、高温强度和断裂性能的关键<sup>[6-7]</sup>, 因此时效对合金的作用显得尤为重要。

本文将对充分固溶后的 Mg-Gd-Y-Zr 进行不同时效处理, 了解合金固溶及时效时发生的组织变化, 研究不同时效温度和时间对镁合金性能的影响规律, 以期制定最佳的 Mg-Gd-Y-Zr 合金生产工艺, 推动该高性能 Mg-Gd-Y-Zr 合金的应用。

## 1 试验材料及方法

合金采用高纯镁锭、Mg-30Gd(质量分数, %,下同)、Mg-30Y、Mg-30Zr 中间合金在坩埚电阻炉中熔炼, 溶剂保护, 专用精炼剂精炼, 780 °C 时进行金属模浇注。合金成分为: 11%Gd、0.7%Y、0.3%Zr, 其余为 Mg。

为保证所研究的 Mg-Gd-Y-Zr 充分固溶而又避免低熔点相在固溶过程中溶解, 设计的热处理工艺为逐步升温固溶工艺, 最高固溶温度为 525 °C。在

不同温度下时效: 室温、100 °C、200 °C、250 °C。

在 CMM-33 金相显微镜上进行显微组织观察; 利用 HDI-1875 型布洛维硬度计测量不同时效处理下合金的维氏硬度, 绘制合金的时效硬化曲线。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 Mg-Gd-Y-Zr 镁合金的金相组织特征

图 1 所示为实验合金在不同工艺状态下的显微组织。

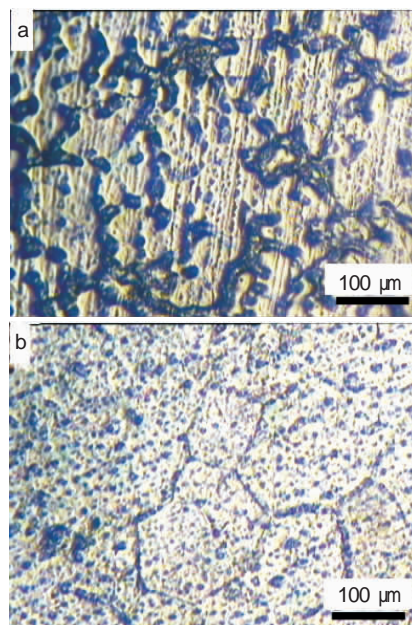


图 1 实验合金在不同工艺状态下的显微组织  
a- 铸态(200 倍); b- 固溶 200 °C 人工时效(200 倍)

收稿日期: 2008-07-01

作者简介: 方 玲(1978-), 女, 江西上饶人, 讲师, 硕士, 主要从事有色金属及其复合材料研究工作;

张小联(1965-), 男, 江西于都人, 教授, 主要从事有色金属材料研究工作。

图 1(a)为合金铸态时的显微组织。由图可见,合金在快速冷却的凝固条件下存在着粗大的枝晶;有许多“蛛网”状组织分布在晶界附近或遍布晶内,晶内有形核痕迹的富 Zr 粒子,同时可以看到 Gd、Y 元素在枝晶壁上偏析。这是由于 Gd、Y 元素的相对密度远远大于镁元素,在凝固过程中,容易造成偏析,且由于晶界处的形核能低,所以 Gd、Y 元素偏析聚集在晶界处<sup>[6]</sup>。

图 1(b)为合金经固溶时效处理后的显微组织。由图可看出合金经过长时间高温充分固溶后,铸态组织中粗大的枝晶大部分消除,晶界隐约可见。从图中还可以看到,晶内有大量弥散分布的相产生,这是铸态时聚集偏析在晶界处含 Gd、Y 相溶解后,在晶内连续弥散析出,这些弥散相晶粒尺寸很小且分布均匀弥散,该析出相的产生是引起硬度升高的主要原因。

## 2.2 Mg-Gd-Y-Zr 镁合金在 200 °C 人工时效时的时效硬化特征

图 2 为实验合金经充分固溶后,在 200 °C 时效时其硬度随时间变化的曲线。

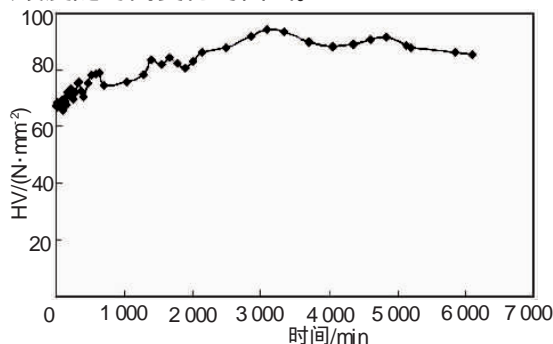


图 2 实验合金 200 °C 时效时的硬化曲线

由图 2 可以看出:合金的硬度在时效初期显著增加,维氏硬度从 65.60 N/mm<sup>2</sup> 上升到 79.28 N/mm<sup>2</sup>,之后略微下降,而后随着时效时间延长,硬度再次缓慢升高,虽稍有波动,但总趋势是一直增加直到峰值 94.5 N/mm<sup>2</sup>,当出现峰值后硬度开始平缓下降。这些硬度变化的根本原因在于时效过程中的组织结构演变,主要是相结构从非平衡相向平衡相变化,淬火后的过饱和固溶体中溶质原子析出弥散沉淀相所起的析出强化作用所致。

时效条件下经固溶淬火后的过饱和固溶体会分解析出第二相。分解析出过程属扩散型相变,由温度和时间控制。Mg-Gd-Y-Zr 系合金时效析出过程中经历 4 个阶段<sup>[7]</sup>,即从 (DO<sub>19</sub>) (bcc)  $\gamma_1$ 。DO<sub>19</sub> 结构的析出相和 bcc 结构的  $\gamma_1$  会对 Mg-RE 系合金产生明显的时效强化。时效开始后,有明显的

时效硬化效应,即相变开始,首先析出  $\gamma_1$  相,此相有较好的强化作用,所以随着时效时间的增加,硬度逐步升高,随着时效的进行,硬度达到最高值,此时时效析出相的结构为  $\gamma_1$ ,它是阻碍基面位错滑移最有效的析出相。

随着时效时间的延长,当合金硬度达到峰值后,说明此时过饱和固溶体已趋于稳定,此后固溶体中不再析出新相,但相变继续进行,转化为  $\gamma_1$  相及平衡相  $\gamma_2$  析出,亚稳相  $\gamma_1$  在原位转化为平衡相  $\gamma_2$ ,正由于这大量存在的  $\gamma_1$  相,导致试样在峰值之后硬度平缓下降。相变结束后,时效继续进行,由于界面能的作用,出现析出相本身的长大与消溶的过程,即通过溶解析出,大的析出相长大,而小的析出相溶解消失,所以峰时效后析出相的晶粒开始长大,晶粒密度减少,其阻碍位错运动的能力降低,故硬度呈下降趋势。

在 200 °C 时效温度下,合金淬火后析出相的数量随着时间的延长而增加,粒度则随时效时间的延长而增大,且随着时效的进行,存在从 (DO<sub>19</sub>) (bcc)  $\gamma_1$  的时效相变过程,从而使时效硬度出现以下规律:开始硬度值迅速增加,出现小峰值,随后继续增长,达到峰值后,硬度平缓下降,但下降值不大。

## 2.3 时效温度对 Mg-Gd-Y-Zr 镁合金时效特征的影响

图 3 为实验合金经充分固溶后,分别在室温 (10 °C)、100 °C、200 °C、250 °C 下的时效硬化曲线。

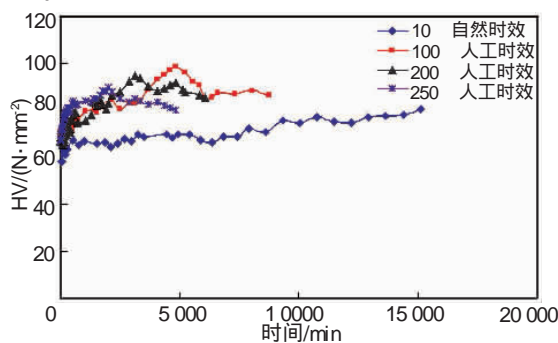


图 3 实验合金在不同温度下时效的硬化曲线

由图 3 可以看出:在 10 °C 室温下自然时效时,合金的硬度变化总趋势是随时效时间的延长而提高,但增长缓慢,时效对硬度影响不大,而在 100 °C、200 °C、250 °C 时效时,都存在明显的硬化过程,这是由于合金的力学性能与时效过程中析出相的数量和大小密切相关,而时效温度越高,过饱和固溶体分解速度越快,但析出相粗化的也越快<sup>[8]</sup>。

另外从图中看到 250 °C 时效的峰值硬度值比

200 °C 时效的峰值低, 到达峰值的时间短; 100 °C 时效的峰值硬度值比 200 °C 时效的峰值则更高, 而其峰值到达的时间则延长, 且 10 °C 下自然时效在实验进行了 11 d 都未达到峰值。这主要是因为时效的温度较低时, 强化相的晶粒长大的速度较慢, 形成的强化相更加细小且具有一定的弥散度, 其弥散强化作用更大, 从而出现合金在低温时效时峰值更高。较高的时效温度使析出过程加快, 析出相的大小及密度增加较快, 使得过饱和固溶体由非平衡态向平衡态转变速度加快, 即峰值时间较短。另外过饱和固溶体中析出相的析出过程及速度受新相的形核率及溶质原子的扩散系数控制, 在低温 (室温) 下这两个参数都非常小, 以致合金固溶淬火后的过饱和固溶体的新相析出速度非常缓慢, 过饱和固溶体由非平衡态向平衡态转变所需时间长, 故在本研究的自然时效实验中相变析出并没结束, 还在进行, 所以硬度还未达到峰值。

### 3 结 论

(1) Mg-Gd-Y-Zr 合金在铸态下, 晶界富集含大量 Gd、Y 的偏析相, 经过固溶处理后, 能基本消除晶界处的偏析, 时效处理后, 细小弥散的析出相使合金的性能得以提高。

(2) 200 °C 时, 合金硬度随时效时间的延长而提高, 出现小峰值, 随后继续增长, 达到峰值后, 硬度缓慢下降, 逐渐趋于平稳。

(3) 随着时效温度的提高, Mg-Gd-Y-Zr 合金的时效峰值明显提前即出现峰值时间更早; 而峰值硬度则随时效的温度提高而下降。

#### 参考文献:

- [1] 李元元, 张卫文, 刘 英, 等. 镁合金的发展动态和前景展望[J]. 特种铸造及有色合金, 2004, (1): 14-17.
- [2] 张 静, 潘复生, 李忠盛. 耐热镁合金材料的研究和应用现状[J]. 铸造, 2004, 53(10): 770-772.
- [3] 邓玉勇, 朱 江, 李 立. 新型金属材料镁合金的发展前景分析[J]. 化工技术经济, 2002, 20(4): 9-13.
- [4] 吴安如, 董丽君, 夏长清, 等. 稀土元素对镁合金高温力学性能的影响[J]. 热加工工艺, 2006, 35(4): 26-30.
- [5] 郭旭涛, 培 杰, 刘树勋, 等. 稀土耐热镁合金发展现状及展望[J]. 铸造, 2002, 51(2): 68-71.
- [6] 肖 阳, 张新明, 蒋 浩, 等. Gd 和 Y 偏析对 Mg-9Gd-4Y-0.6Zr 和 Mg-7Gd-4Y-0.6Zr 合金组织性能的影响[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2007, 38(1): 24-29.
- [7] 陈部湘, 张新明, 邓运来, 等. 时效对 Mg-9Gd-4Y-0.6Zr 挤压合金组织与性能的影响[J]. 湖南有色金属, 2007, 23(1): 35-37.
- [8] 杨云龙. HZL114A 合金时效过程研究[D]. 南宁: 广西大学, 2006: 18-21.

## On the Law of Age-hardening of Mg-Gd-Y-Zr Magnesium Alloy

FANG Ling, ZHANG Xiao-lian, TAN Ai-hua, YANG Shao-min

(Jiangxi Magnesium Alloy Engineering Research Center, School of Chemistry and Life Science, Gannan Normal University, Ganzhou 341000, Jiangxi, China)

Abstract: Through the full solution and aging at different temperatures, the microstructure and hardness of Mg-Gd-Y-Zr alloy in the process of aging are studied. The results showed the segregation of the Gd and Y in the grain boundary can be eliminated almost completely by full solution treatment; aged at 200 °C, the value of hardness increases rapidly at the beginning, and then emerges a little peak, after that the value rises slowly; the hardness begins to fall down slowly when reaches its peak hardness; The higher the aging temperature, the smaller the peak hardness, and the shorter the time of reaching the peak hardness.

Key words: Mg-Gd-Y-Zr; age-hardening; hardness; microstructure

(编辑: 尹晓星)