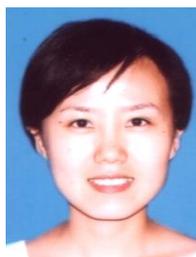


Mg-Gd-Y-Nd-Zr 合金的高温固溶研究

仲莹莹 沈枫 杨京 李文瑛

(航天科工防御技术研究试验中心, 北京 100854)



摘要: 采用拉伸、金相组织观察、SEM 扫描等方法, 研究了不同固溶对 Mg-Gd-Y-Nd-Zr 合金组织和力学性能的影响。结果表明, Mg-Gd-Y-Nd-Zr 合金经过 510℃ 固溶处理后, 样品中的伪共晶组织及偏析产物消失, 但合金中残留粗大的富稀土粒子。合金经高温 560℃ 固溶处理后, 能基本消除晶界处的偏析, 其塑性提高, 延伸率提高 50%。

关键词: 镁合金; 固溶; 显微组织; 力学性能

High Temperature Solution Treatment of Mg-Gd-Y-Nd-Zr Alloy

Zhong Yingying Shen Feng Yang Jing Li Wenying

(China Aerospace Science & Industry Corp Defense Technology R & T Center, Beijing 100854)

Abstract: The effects of different solution-treatment conditions on the microstructure and mechanical properties of Mg-Gd-Y-Nd-Zr alloy are investigated by tensile test, OM and SEM measurement. The results show that, after solution treatment at 510℃, the pseudo eutectic structure disappears with some RE shot leaving. After solution treatment at 560℃, segregation of grain boundary is basically eliminated to improve their plasticity and elongation increases by 50%.

Key words: magnesium alloy; solution treatment; microstructure; mechanical properties

1 引言

随着国家高新工程武器装备指标的提高, 对应用高强度、耐高温、抗腐蚀新型轻质合金材料的需求越来越迫切。镁合金具有比重低, 比强度高, 阻尼性能良好, 容易切削加工的优点, 在航天和航空工业中得到了广泛的应用^[1, 2], 航天型号上的大型薄壁舱体、异型薄壁板形零件、舵面、弹翼等多采用镁合金。添加稀土可以明显改善镁合金的热稳定性和高温强度, 还可以提高镁合金的韧性、铸造性能、焊接性能和耐腐蚀性等性能^[3, 4]。典型的 Mg-Y-Nd 系合金, 如 WE54、WE43 合金热处理后各项性能也优于其他镁合金^[5]。为了改善 Mg-RE 系耐热镁合金脆性问题, 国内外研究者正试图通过合金化或微合金化以及热处理等手段提高 Mg-RE 系镁合金的耐热抗蠕变性能、韧性、抗腐蚀性能、铸造性能等综合性能^[6~8]。本文研究了

热处理对 Mg-8Gd-4Y-2Nd-0.6Zr 合金组织和性能的影响, 以期通过优化热处理工艺来改善和提高 Mg-RE 系耐热镁合金的性能。

2 实验材料及方法

用普通电阻炉进行熔炼, 合金元素以 Mg-30%Gd、Mg-30%Y、Mg-30%Nd 和 Mg-30%Zr 中间合金的形式添加, 用自制的熔剂进行熔体表面覆盖, 合金的熔炼及浇注温度分别为 800℃ 和 765℃, 熔体浇注到 $\Phi 60\text{mm} \times 150\text{mm}$ 的薄壁铁筒中进行水冷成锭, 铸锭的冷却速度保证在 1min 内冷却到 100℃ 以下。合金成分为 Mg-8Gd-3Y-2Nd-0.6Zr。

拉伸试棒统一制成 $\Phi 8\text{mm}$ 的短比例试样, 在 CSS44100 电子万能试验机上进行室温拉伸, 拉伸方法按照 GB/T228—2002 标准进行; 在 Instron8032 试验

机上进行高温拉伸，拉伸方法按照 GB/T4338—1995 标准进行，保证在 1h 内升到预设的实验温度，试样经 15min 的保温后开始加载拉伸，室温和高温的拉伸速率统一为 0.5mm/min。用 D/maxrA 型转靶 X 射线衍射仪进行相分析，用 XJP6A 型立式光学显微镜进行金相观察，用 KYKY2800 型扫描电镜和 Sirion200 场发射扫描电镜及附带的 Genesis60S 能谱分析仪进行组织分析。

3 实验结果及分析

3.1 铸态显微组织分析

图 1 为合金铸态下的显微组织。从图 1a 可以看出，铸态合金的组织均匀，晶粒细小，铸态合金的晶粒直径为 50~80 μm ，这与 Zr 在镁合金中具有明显的细化晶粒作用有关^[9]。同时在晶界附近存在不连续的初生相，大多数第二相连续地分布在枝晶界处，少量以颗粒状分布在枝晶界和晶内。晶界上有大量的伪共晶组织存在^[10]，这些组织对于合金的整体力学性能十分有害，必须在下一步的固溶过程中使之溶入基体中去。

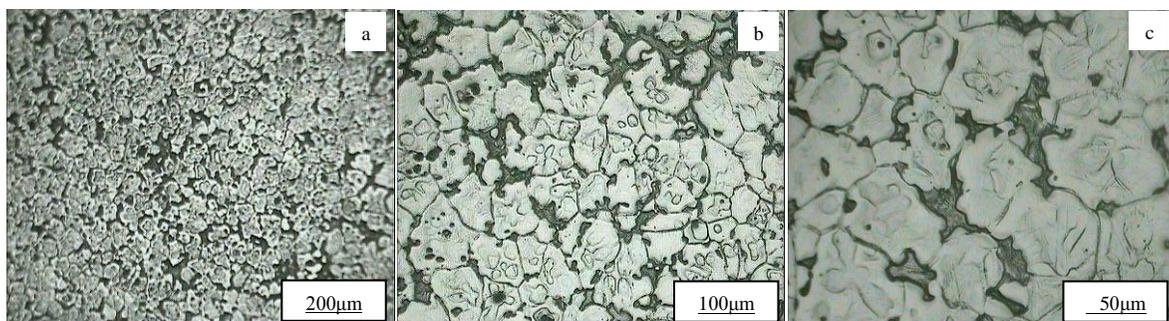


图 1 Mg-8Gd-3Y-2Nd-0.6Zr 合金铸态的金相照片

从图 2 可以看出，基体的成分与合金的实际成分大体相近，基体中的 Mg 含量（质量分数，下同）大约占 90%，Gd 元素约占 8%，Y 元素约占 3%，Nd 元素约占 2%，并有少量的 Zr 元素。析出相的成分与基

体差别较大，其中 Mg 含量下降，Gd、Y 和 Nd 元素所占比例明显增加，分别达到 13%、4%和 6%。由此可见，图中沿晶界分布的物质是 Gd、Y、Nd 元素在凝固过程中沿晶界形成严重的枝晶偏析。

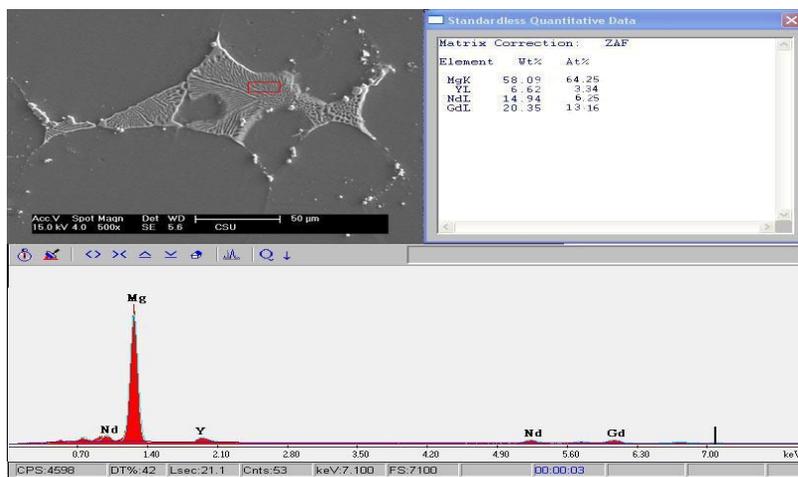


图 2 SEM 扫描及能谱分析

3.2 低温固溶态显微组织分析

在 DTA 试验中，样品温度的变化是由于相转变或反应的吸热或放热引起的，比如相转变、熔化或氧化还原反应、脱氢反应、晶格结构的破坏等，当样品

发生物理或化学变化时，所释放或吸收的热量使试样温度高于或低于参比物的温度，从而相应地在差热分析曲线上得到放热或吸收峰，峰的面积正比于反应中热量的变化。

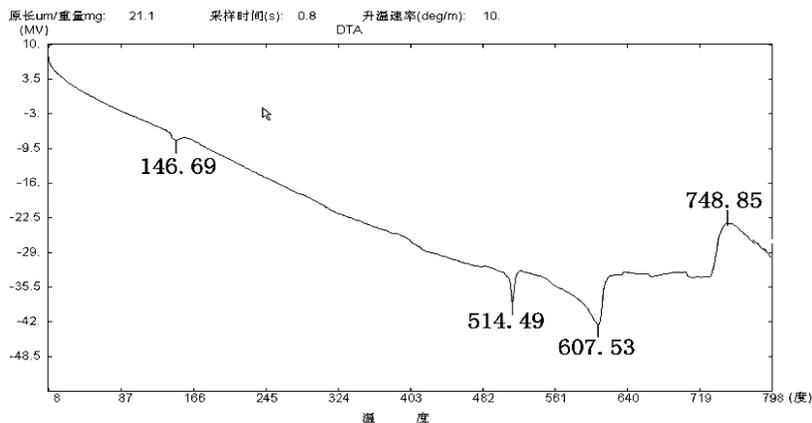


图 3 Mg-8Gd-3Y-2Nd-0.6Zr 合金的 DTA 差热分析曲线

根据图 3DTA 差热分析的结果，在 514℃时有一个吸热峰，表明伪共晶的熔化温度为 510℃左右。在国内外稀土镁合金的热处理制度的基础上^{[11]、[12]}，首先采用较低温度 510℃固溶的方法，延长固溶时间，取 12h, 24h, 48h 进行金相观察。图 4a、4b、4c 分别是固溶 12h、24h、48h 的金相照片。从金相照片中可以看到，晶界上有大量的粒子，固溶 12h 后仍有少量的伪共晶组织在晶界上残留，说明固溶时间不够，应继

续延长。固溶 24h 后发现晶界上有大量的黑色粒子分布，另外有极少数的伪共晶组织没有消除。经过 48h 的固溶处理，所有的伪共晶组织全部消失，在晶界上，只留下了大量的黑色粒子。可知，在 510℃时，样品的扩散速度较低，需要较长的时间才能使伪共晶溶入基体中去，在工业应用上实用价值不高。下一步实验，应尽可能地提高固溶温度，一方面缩短固溶时间，另一方面使富稀土的粒子溶入到基体中去。

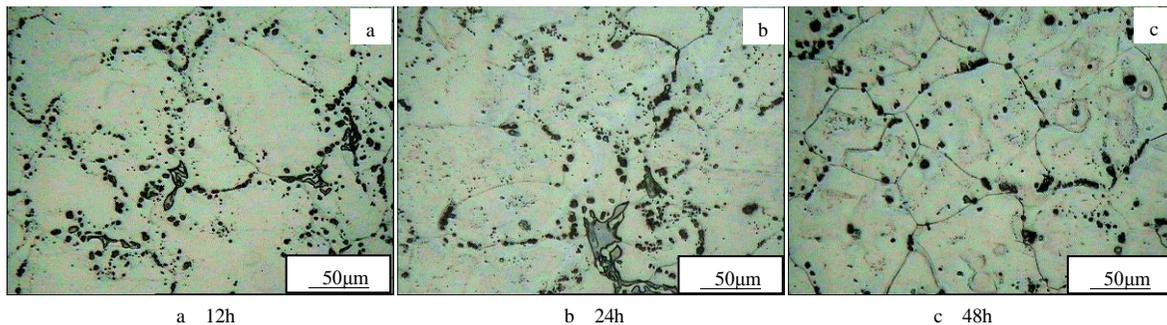


图 4 Mg-8Gd-3Y-2Nd-0.6Zr 合金 510℃固溶态的金相照片

3.3 高温固溶态样品组织分析

因富稀土粒子的熔点较高，因此我们希望采用高温固溶的方法来使其融入基体中。但是镁合金在高温

下扩散速度过快，应采用短时高温的方法来达到的。图 5 为样品经 560℃固溶处理后的金相照片。

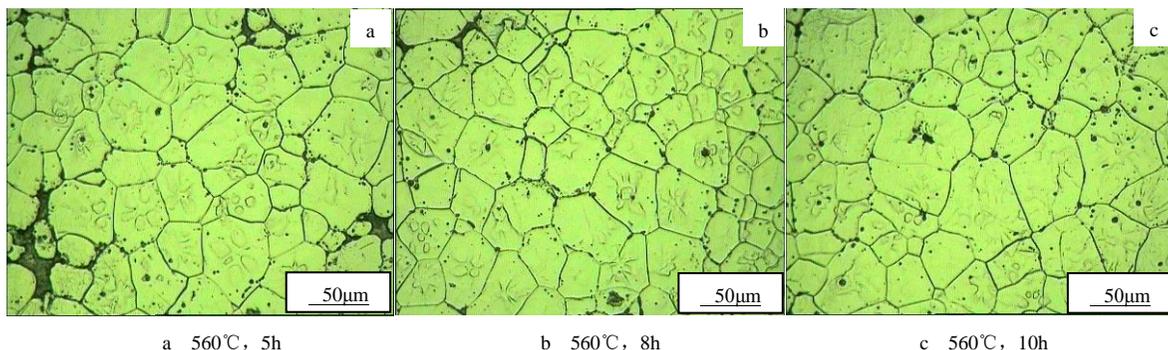


图 5 Mg-8Gd-3Y-2Nd-0.6Zr 合金高温 560℃固溶态的金相照片

图 5a 为 560℃ 5h 固溶处理后的金相照片, 晶粒较细, 晶界明显显露出来, 并且弥散的粒子数量比 510℃ 固溶处理后的样品明显减少, 只是晶界周围有少量的伪共晶组织没有消除; 继续保温 3h, 则伪共晶组织进一步消失, 见图 5b; 图 5c 为 560℃ 10h 固溶处理的金相组织, 显示伪共晶组织完全消除, 并且弥散分布的粗大富稀土粒子明显消失。可以说, 该固溶处理是比较成功的热处理方法。

表 1 不同热处理状态合金的力学性能测试

	热处理制度	σ_b /MPa	$\sigma_{0.2}$ /MPa	δ /%
铸态		270	225	2.6
铸态 T4	510℃ 48h	214	193	2.1
铸态 T4	560℃ 10h	258	202	4.8

4 结束语

a. Mg-8Gd-3Y-2Nd-0.6Zr 合金在铸态下, 晶界富含大量 Gd、Y、Nd 的偏析相, 这些物质影响了合金的性能;

b. 经过 510℃ 固溶处理后, 样品中的伪共晶组织及偏析产物消失, 但合金中残留粗大的富稀土粒子, 因此力学性能不佳;

c. 经过高温固溶处理后, 能基本消除晶界处的偏析, 同时合金的塑性提高, 延伸率提高了 50%。

参考文献

- Alves H, Koster U, Aghion E, et al. Environmental behavior of magnesium and magn-esium alloys[J]. *Materials Technology*, 2001, 16(2): 110~126
- Baghni I M, Wu Y S, Li J Q, et al. Mechanical properties and potential applications of magnesium alloys[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2003, 13(6): 1253~1259
- 郭旭涛, 李培杰, 刘树勋, 等. 稀土耐热镁合金发展现状 & 展望[J]. 铸造出版社, 2002, 51: 68~71
- 吴价宝. 稀土对镁合金抗蠕变性能的影响[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2007
- Ding Wenjiang, Wang Qudong, Lu Yizhen, et al. Application of rare earth

3.4 力学性能分析

不同处理状态下合金的室温拉伸力学性能如表 1 所示。可以看出, 铸态合金经 510℃ 48h 固溶处理后, 由于粗大富稀土粒子的存在, 其力学性能较差。铸态合金经过高温固溶处理后, 晶界处偏析相消除, 所以合金的塑性提高, 但由于晶粒长大, 其抗拉强度和屈服强度有所降低。

metals in cast Magnesium alloy[J]. *Special Casting & Nonferrous Alloys*, 1999, 40(1)

- He S. M., Zeng X. Q., Peng L. M., et al. Microstructure and strengthening mechanism of high strength[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2007, 427: 316~323
- Zhu S. M., Nie J. F., Gao X.. Enhanced age hardening response and creep resistance of Mg-Gd alloys containing Zn[J]. *Scripta Materialia*, 2005, 53: 1049~1053
- Gao Y., Wang Q. D., Gu J. H., et al. Behavior of Mg-15Gd-5Y-0.5Zr alloy during solution heat treatment from 500 to 540[J]. *Materials Science and Engineering*, 2007, A (459): 117~123
- 彭卓凯, 张新明, 陈健美. Zr在Mg-9Gd-4Y中的晶粒细化机制[J]. 北京科技大学学报, 2006, 28(2): 150~152
- 张新明, 陈健美, 邓运来, 等. Mg-Gd-Y-(Mn,Zr)合金的显微组织和力学性能[J]. 中国有色金属学报, 2006, 16(2): 219~226
- Apps P J, Karimzadeh H, King J K. Precipitation reactions in Magnesium-rare earth alloys containing Yttrium, Gadolinium or Dysprosium[J]. *Scripta Materialia*, 2003, 48(8): 1023~1028
- Nie J. F., Muddle B C. Characterisation of strengthening precipitate phases in a Mg-Y-Nd alloy[J]. *Acta materialia*, 2000, 48: 1691~1703