

# Mg-6Zn-(Al, Ca) 镁合金显微组织及力学性能

万晓峰<sup>1</sup>, 马 骏<sup>2</sup>, 汪兴兴<sup>1</sup>

(1. 南通大学 机械工程学院, 江苏 南通 226019; 2. 南通农业职业技术学院 机电工程系, 江苏 南通 226007)

**摘要:**利用 WD-10A 电子拉伸试验机和 RD2-3 型蠕变试验机对 Mg-6Zn-(Al, Ca) 系列镁合金的力学拉伸强度及高温蠕变性能进行测试, 研究其显微组织对高温性能的影响, 并利用金相显微镜、扫描电镜、X 射线衍射分析等方法进行分析表征。研究表明, Mg-6Zn-2Al-0.3Mn (ZA62) 具有较好的综合力学性能, 其铸态显微组织主要由  $\alpha$ -Mg 基体和致密片状  $Mg_{51}Zn_{20}$  共晶相组成。少量 Ca 加入 ZA62 合金后, 抑制了  $Mg_{51}Zn_{20}$  相的析出, 并代之形成了含 Ca 的 MgZn 相和  $\tau$  相。随 Ca 加入量增加, 晶间相的数量增加, 合金组织中出现另一热稳定四元 Mg-Zn-Al-Ca 化合物相。当  $w(\text{Ca}) > 0.5\%$  时, 合金晶粒显著细化。随 Ca 含量增加, 合金常温拉伸强度和塑性呈下降趋势, 基体显微硬度减小。加入 Ca 提高了合金高温拉伸强度, 改善了合金蠕变性能。在 175 °C/70 MPa 条件下, 合金蠕变性能受合金晶粒尺寸影响, 随晶粒尺寸的减小, 蠕变变形量增加。

**关键词:** Mg-6Zn-2Al-0.3Mn 镁合金; 显微组织; 力学拉伸强度; 蠕变性能

中图分类号: O643

文献标志码: A

文章编号: 1673-2340(2012)02-0033-08

## Microstructures and Mechanical Properties of Mg-6Zn-(Al-Ca) Alloys

WAN Xiao-feng<sup>1</sup>, MA Jun<sup>2</sup>, WANG Xing-xing<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China;

2. Department of Mechanic and Electric Engineering, Nantong Agricultural Vocational Technology College, Nantong 226007, China)

**Abstract:** Tensile strengths and creep properties of the Mg-6Zn-(Al, Ca) series magnesium alloy are tested by using WD-10A electronic universal testing machine and RD2-3 creep tester, and the effect of microstructure on high temperature properties are investigated. The microstructure analysis of specimens is carried out by means of the metallographic microscope, scanning electron microscope and X-ray diffraction analysis et al. The results show that as-cast microstructure Mg-6Zn-2Al-0.3Mn (ZA62) alloy consists of the  $\alpha$ -Mg and eutectic phase  $Mg_{51}Zn_{20}$ , the eutectic  $Mg_{51}Zn_{20}$  have been gradually replaced by Ca-containing MgZn phases and  $\tau$  phases when Ca is added into the ZA62 alloy, further addition of Ca leads to the increasing of grain boundary phases with another new Mg-Zn-Al-Ca phases. Though the grains have been refined by addition of 0.5% Ca obviously, both strength and ductility drops at ambient temperatures with the increase of Ca. For Ca additions, improved elevated temperature properties are obtained as compared to the ZA62 based alloy due to the thermal stability of Ca-containing phases. At the creep condition of 175 °C/70 MPa, the creep strains of alloys Mg-6Zn-2Al-xCa increase with the decrease of grains size.

**Key words:** Mg-6Zn-2Al-0.3Mn Alloy; microstructure; tensile properties; creep properties

收稿日期: 2012-03-21

基金项目: 江苏省高校自然科学基金项目(10KJB430012); 南通市应用研究计划项目(BK2011063)

作者简介: 万晓峰(1980—), 男, 讲师, 博士, 主要从事材料组织和性能的研究. E-mail: wan.xf@ntu.edu.cn

镁合金作为最轻的金属结构材料(质量密度一般低于  $2 \text{ g/cm}^3$ ), 具有高比强度和比刚度, 良好的铸造性能、可切削加工性能、阻尼减震性能及良好的导电导热性等诸多优势, 目前在汽车、电子、航空航天等领域应用日益增多<sup>[1-2]</sup>. Al 是镁合金中重要的合金元素, 在 Mg 基体中有较大的固溶度. 加入 Al 能够提高镁合金的室温强度并改善其铸造性能, 因此 Mg-Al 系合金(如 AZ91 和 AM60 等)是目前工业上应用较广泛的合金系列. 然而, 这类常用镁合金由于高温易软化  $\beta(\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12})$  相的存在, 合金一般只能用于常温, 在工作温度超过  $120 \text{ }^\circ\text{C}$  后, 合金的抗蠕变性能大幅度下降<sup>[3-4]</sup>. Zn 作为镁合金中的另一重要合金元素, 其质量分数达 6.2%, 具有明显的固溶和沉淀强化作用. 由于 Mg-Zn 基镁合金中存在稳定性比  $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  要高的 Mg-Zn 相, 基于该系合金开发低成本高温镁合金很有潜力<sup>[5-7]</sup>.

目前应用的 Mg-6Zn-(0.4~0.7)Zr(ZK60) 镁合金, 是现有商用镁合金中强度最高的一种, 但还存在热裂倾向严重、熔炼时易产生 Zr 偏析、高温性能差以及高成本等缺点, 因此限制了这类合金的大量使用<sup>[8-9]</sup>. 在 Mg-6Zn 基合金基础上添加少量 Al, 不仅可以改善合金的铸造性能, 增加合金固溶强化效果, 进一步提高合金强度, 同时也具有一定的晶粒细化作用. Ca 加入镁合金中不仅可以替代 Zr 起到细化晶粒作用, 也对合金强度, 尤其高温性能具有改善作用<sup>[10]</sup>. 本文在 Mg-6Zn-Al 合金基础上, 通过添加 Ca 进行合金化, 系统研究该 Mg-Zn-Al-Ca 四元合金显微组织和力学性能的关系.

## 1 实验部分

### 1.1 材料制备

实验共制备了 7 种成分的合金, 均在井式坩埚炉中熔炼, 合金的成分列于表 1. 其中 1#~3# 合金为 Mg-6Zn 基础上添加不同量 Al, 目的是确定 Al 的适当加入量. 其它几种合金均加入不同量 Ca, 以考察 Ca 的加入对合金组织和性能的影响. 一定量 Mn 的加入以降低杂质元素的有害作用, 提高熔炼质量. 熔炼时 Ca 采用中间合金的方式加入,  $m(\text{Mg}):m(\text{Ca}) = 7:3$ , 配料时考虑了各合金元素在熔炼过

程中的烧损率, 因此对各元素进行一定比率的增配. 熔炼和浇注过程中采用摩尔分数为 1% 的 SF<sub>6</sub> 和 99% 的 CO<sub>2</sub> 混合气体保护. 配制合金前原料均在烘箱中预热到  $250 \text{ }^\circ\text{C}$ . 合金完全熔化后, 熔体在  $720 \text{ }^\circ\text{C}$  下保温静置 25 min 后浇入金属铜模中. 合金热处理(T4)在 SX-2.5-10 箱式电阻炉中进行.

表 1 合金成分

编号	合金成分					%
	Mg	Zn	Al	Ca	Mn	
1# ZA61	Bal.	6.0	1.0	—	—	0.3
2# ZA62	Bal.	6.0	2.0	—	—	0.3
3# ZA64	Bal.	6.0	4.0	—	—	0.3
4# ZAX6202	Bal.	6.0	2.0	0.2	—	0.3
5# ZAX6205	Bal.	6.0	2.0	0.5	—	0.3
6# ZAX6210	Bal.	6.0	2.0	1.0	—	0.3
7# ZAX6220	Bal.	6.0	2.0	2.0	—	0.3

注:表中数据为质量分数.

### 1.2 测试与表征

拉伸性能测试在 WD-10A 电子万能试验机上进行, 试样均为片状, 标距尺寸为  $18 \text{ mm} \times 3.2 \text{ mm} \times 1.8 \text{ mm}$ , 用线切割方法直接在铸锭芯部切取. 合金硬度测试在 HV-10A 维氏硬度计上进行, 载荷为 4 kg. 蠕变实验在 RD2-3 型标准蠕变试验机上进行, 蠕变实验条件分别为  $150 \text{ }^\circ\text{C}/70 \text{ MPa}$  和  $175 \text{ }^\circ\text{C}/70 \text{ MPa}$ , 蠕变时间 100 h, 试样按 GB/T 2039—1997 金属拉伸蠕变及持久试验方法加工. 直径和标距分别为 10 mm 和 100 mm. 本文拉伸和蠕变结果均为 2~3 组实验的平均值.

金相试样采用体积分数为 4% 的硝酸酒精溶液腐蚀. 合金显微组织观察采用 Olympus BHM 金相显微镜和 Sirion 场发射扫描电镜(SEM), 微区成分分析采用 Oxford Inca 型能谱色散谱仪(EDAX). 合金组成相分析采用 D/max 2400 X 射线衍射仪(XRD).

## 2 实验结果和讨论

### 2.1 实验结果

#### 2.1.1 Al 加入量的确定

对 1#~3# 合金试样进行拉伸实验, 数据结果如图 1 所示, 可以看出, 在室温和高温( $175 \text{ }^\circ\text{C}$ )条件

下, Mg-6Zn-Al 合金抗拉和屈服强度均随 Al 含量的增加而提高. 而合金伸长率随 Al 含量增加而降低, 尤其是  $w(\text{Al}) > 2\%$  时合金伸长率下降明显. 综合考虑合金力学性能, 以及避免出现弱合金高温性能的 Mg-Al 相, Mg-6Zn 合金中 Al 的质量分数为 2%. 以下 Ca 合金化的研究在 Mg-6Zn-2Al 合金基础上进行.

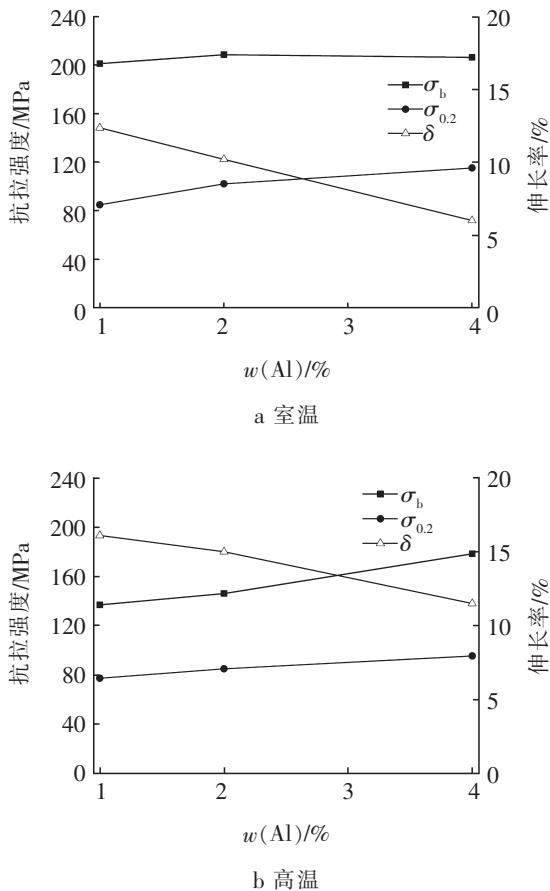


图1 Mg-6Zn-Al 合金拉伸力学性能

### 2.1.2 显微组织

图2所示为 Mg-6Zn-2Al 基合金铸态组织. 从图中可以看出, 随着合金中 Ca 含量的增加, 铸态  $\alpha$ -Mg 枝晶尺寸逐渐细化, 晶间相的数量增加, 晶间相的形态也发生了变化, 在 Ca 含量较多的 ZAX6220 合金中(图 2d), 合金组织中的第二相形成空间网状结构, 几乎将晶粒完全分割开来. 图 3 为各铸态合金经 345 °C, 120 h 固溶后合金组织, 由图可看出, 合金晶粒尺寸随 Ca 加入发生变化, 当  $w(\text{Ca}) = 0.5\%$  时, 晶粒尺寸开始明显减小, 平均在 30~40  $\mu\text{m}$  左右. 另外随 Ca 加入量的增加, 合

金中难溶第二相增加, 说明 Ca 的加入同时改善了合金中第二相的热稳定性, 或形成了新的热稳定性相.

图4为各 Mg-6Zn-2Al 基合金铸态 XRD 图谱. 由图可以看出, ZA62 合金主要由  $\alpha$ -Mg 和  $\text{Mg}_{51}\text{Zn}_{20}$  相组成, 少量 Ca 加入后, 合金中出现  $\text{MgZn}$ ,  $\text{Mg}_{32}(\text{Al}, \text{Zn})_{49}(\tau)$  相, 同时在  $w(\text{Ca}) > 0.5\%$  合金中出现了一种新的化合物相, 根据现有的粉末衍射卡片 (PDF) 资料很难判断该化合物相, 因此对其未能标定. 图5为各合金显微组织, 其中箭头所示区域为各合金主要组成相 SEM 形貌, 其主要元素平均组成, 通过能谱分析示于表 2. 由表可得, ZA62 合金中 A 处致密片状组织相为  $\text{Mg}_{51}\text{Zn}_{20}$  相(空间群  $Immm$ ,  $a = 1.4083 \text{ nm}$ ,  $b = 1.4486 \text{ nm}$ ,  $c = 1.4025 \text{ nm}$ )<sup>[11]</sup>. ZAX6205 合金 C 处呈骨骼状组织相其主要元素组成对应含少量 Ca 的三元骨骼状  $\tau$  相, 其具有体心立方的晶体结构(空间群  $T_h^5$ ,  $a = 1.416 \text{ nm}$ )<sup>[12]</sup>, 而与其相接的在衬度上表现为浅色的另一组织相(D 处), 能谱分析结果其成分对应为含少量 Al, Ca 的块状  $\text{MgZn}$  相, 其属六方晶系的结构(空间群  $P6_3/mmc$ ,  $a = 2.557 \text{ nm}$ ,  $c = 1.814 \text{ nm}$ )<sup>[13]</sup>. 在含 Ca 量较多的 ZAX6210 合金中, 出现了如 E 处所示的片状或网状共晶组织相, 根据 EDAX 能谱分析, 该化合物相为一种 Mg-Zn-Al-Ca 四元化合物, 元素组成区别于其它组织组成相的成分, 结合上述图 4XRD 图谱分析结果, 它可能与图谱中未指标化的衍射峰相对应. 由于现有的化合物还未能发现与该四元相成分相对应, 因此此相化学式和结构未能确定. 图6为 ZAX6210 合金经 345 °C 长时间固溶处理后的组织形貌, 其中共晶组织相几乎未发生分解, 说明 Ca 加入后形成的该 Mg-Zn-Al-Ca 相热稳定性较高.

### 2.1.3 力学性能

表3所示为实验合金室温和高温(200 °C)下拉拉伸力学性能. 由表中可看出, 随着 Ca 含量的增加, 合金铸态室温强度逐渐降低, 塑性下降. 200 °C 高温下, 少量 Ca 的加入后, 合金抗拉强度和屈服强度略有增加, 而  $w(\text{Ca}) > 0.5\%$  后, 合金强度呈下降趋势, 高温下合金塑性随 Ca 含量的增加而减小.

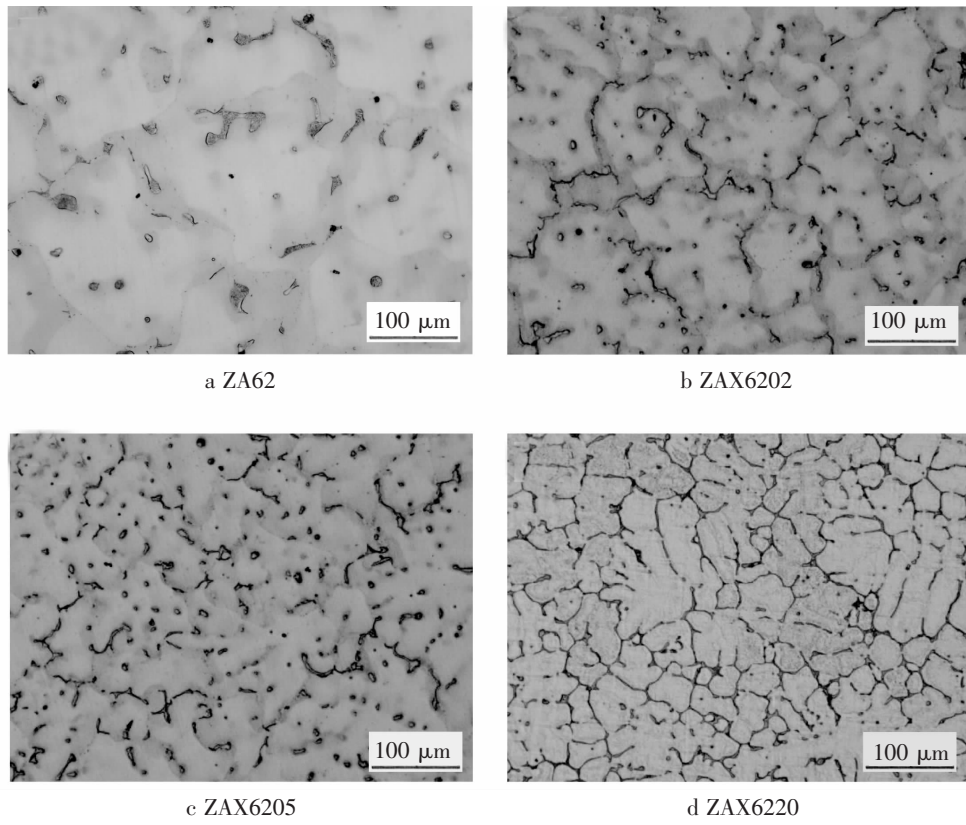


图 2 合金铸态金相组织图

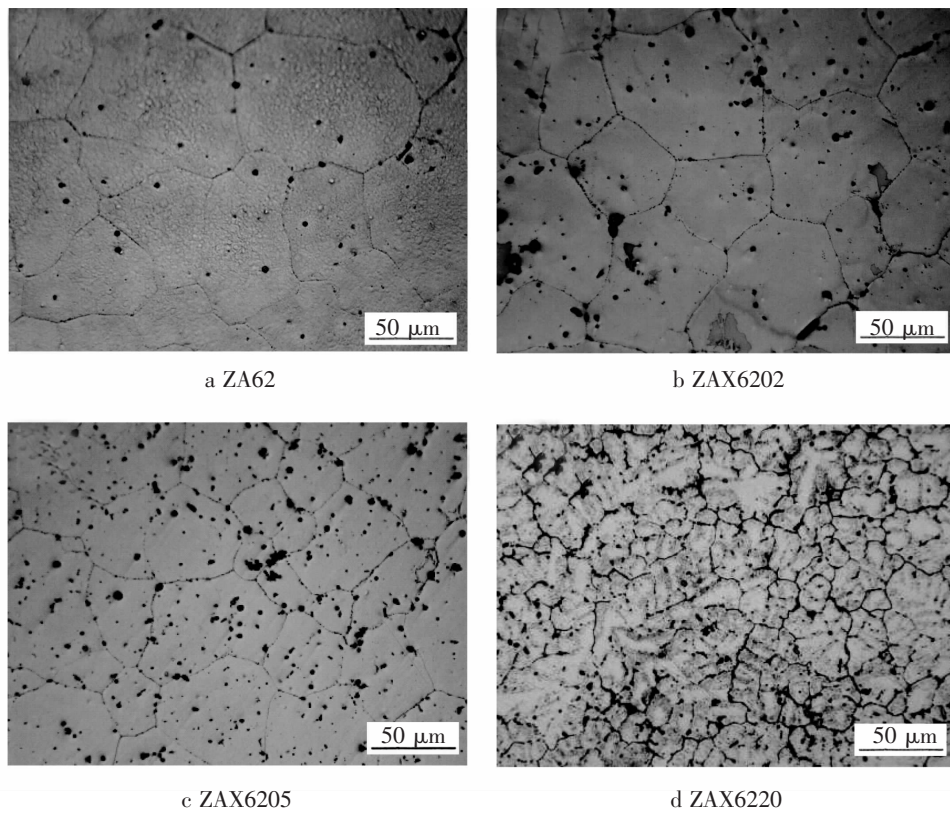
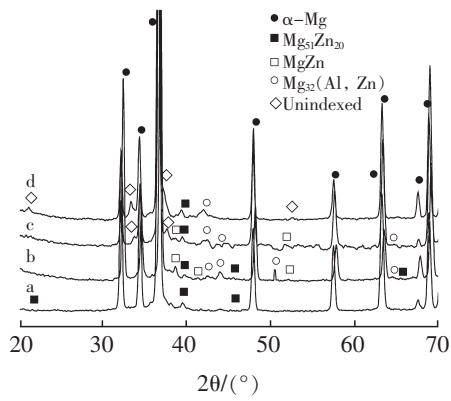
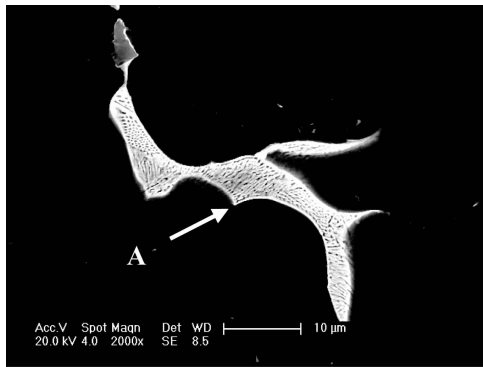


图 3 合金 T4 态(345 °C, 120 h 固溶)金相组织图

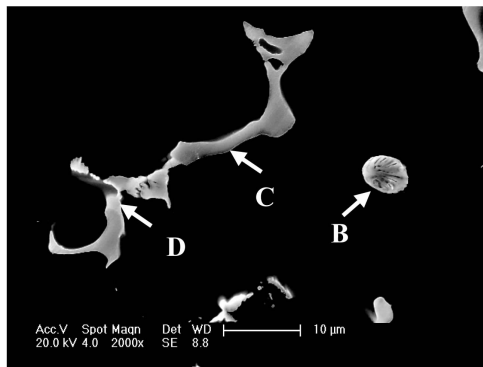


a ZA62; b ZAX6202; c ZAX6205; d ZAX6210.

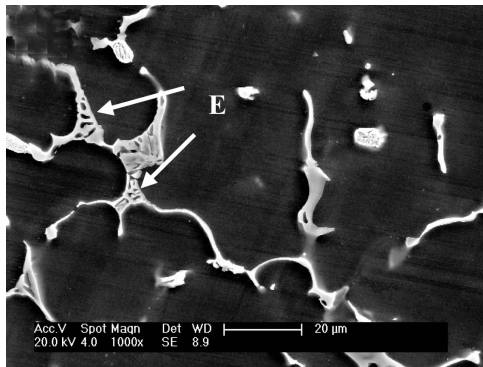
图4 铸态合金 XRD 图谱



a ZA62



b ZAX6205



c ZAX6210

图5 铸态合金 SEM 组织图

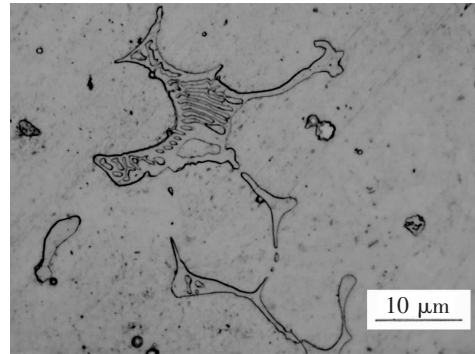


图6 ZAX6210 合金经 345 °C/72 h 处理后的金相组织图

图 7a, b 分别为 ZA62 合金和 ZAX6202 合金不同温度下的拉伸力学性能. 由图 7a 可以看出, 随着温度的增加, ZA62 合金强度下降明显, 塑性呈上升趋势. 而图 7b 中, 随着温度的增加, 合金 ZAX6202 强度同样呈逐渐下降趋势, 但与基体 ZA62 合金相比, ZAX6202 合金强度随温度下降不明显. 说明 Ca 的加入对合金的高温性能有一定的改善作用.

表2 合金各点平均成分 %

元素	A	B	C	D	E
Mg	77.1	65.5	40.3	46.6	73.5
Zn	22.8	27.4	32.6	41.6	10.2
Al	—	5.9	22.7	8.4	8.3
Ca	—	1.1	4.2	3.2	7.9

注:表中数据为原子分数.

表3 加入不同含量 Ca 后合金的室温、高温拉伸力学性能

合金	室温			200 °C		
	$\sigma_b$ / MPa	$\sigma_{0.2}$ / MPa	$\delta$ / %	$\sigma_b$ / MPa	$\sigma_{0.2}$ / MPa	$\delta$ / %
ZA62	208	101	10.2	118	73	20.1
ZAX6202	186	104	6.9	122	88	17.4
ZAX6205	162	98	6.0	127	90	9.0
ZAX6210	147	94	3.4	117	87	6.0
ZAX6220	119	87	2.0	108	75	5.6

#### 2.1.4 蠕变性能

本文测试了各合金的高温抗蠕变性能, 如图 8a, b 所示为实验合金分别在 150 °C 和 175 °C, 70 MPa 条件下典型蠕变曲线. 由图可见, 经 100 h 蠕变后, 实验各合金均未发生断裂, 且在蠕变时间内均保持在稳态蠕变阶段, 在 150 °C/70 MPa 条件下(图 8a), 加 Ca 合金稳态蠕变速率和蠕变延伸率明显要低于

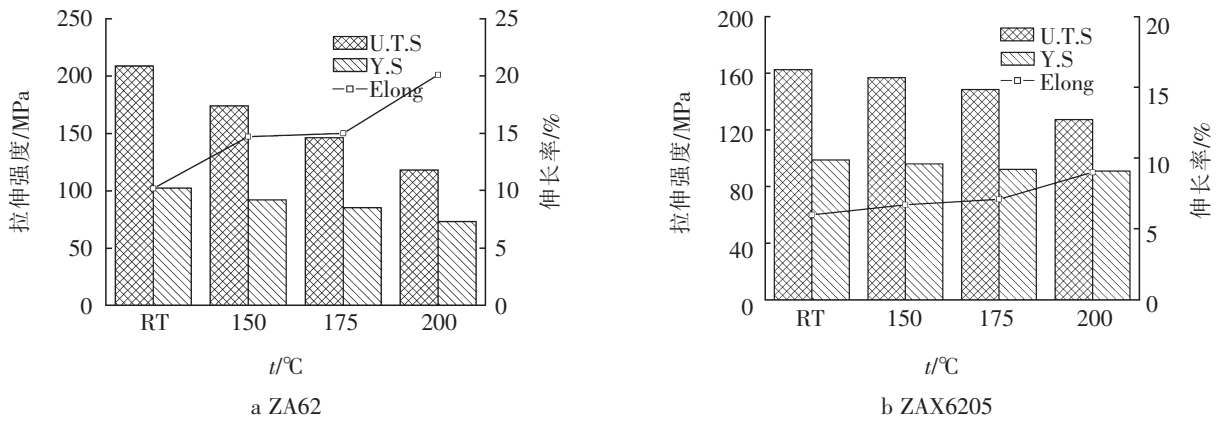


图7 不同温度下合金的拉伸性能

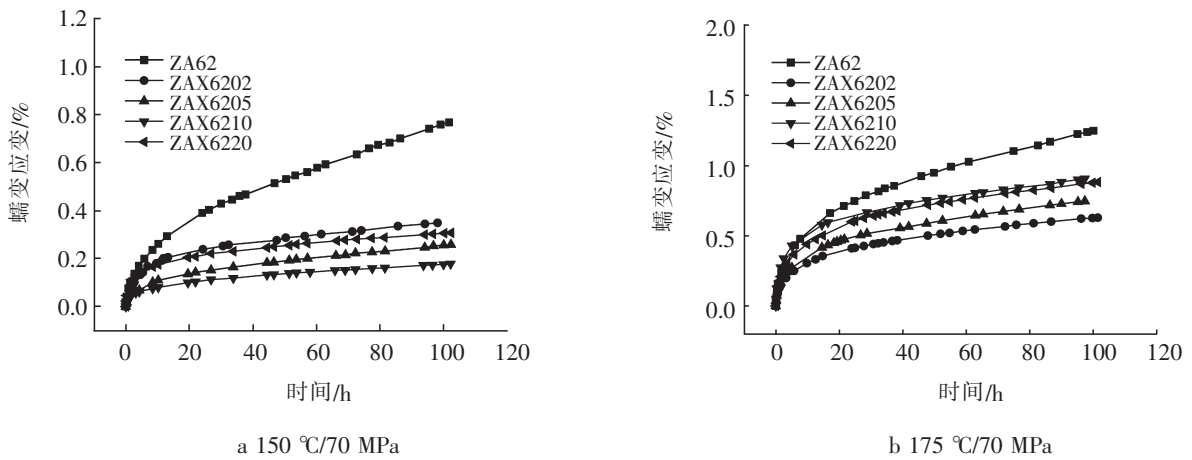


图8 实验合金的蠕变性能曲线图

基体 ZA62 合金,且在  $w(\text{Ca}) < 1\%$  时,随着 Ca 加入量的增加,合金抗蠕变性能提高.在 175 °C/70 MPa 条件下(图 8b),与基体 ZA62 合金相比,含 Ca 合金仍然具有较好的抗蠕变性能.但随着 Ca 加入量的增加合金蠕变延伸率逐渐增加,合金抗蠕变性能随 Ca 添加量的增加而有所下降.

### 2.2 讨论

Ca 加入到 Mg-6Zn-2Al 合金中细化了合金铸态显微组织,溶质原子的细化作用可以用生长限制因子(Growth Restriction Factor, GRF)<sup>[14-15]</sup>来描述:  $GRF = \sum_i m_i C_{0,j} (k_i - 1)$ , 其中,  $m_i$  是二元相图中液相线斜率,  $C_{0,j}$  为溶质的初始浓度,  $k_i$  为元素  $i$  的平衡分配系数. GRF 反映了合金熔体中形成一个稳定晶核的能力, GRF 值越大,越容易形成形核核心.图 9 为几种元素对纯镁晶粒细化作用的关系图.从图中可以看到, Ca 是能够显著细化 Mg 合金的主要元

素之一.本文 Ca 加入到合金中具有较大偏析倾向,能够使生长晶粒的液固前沿产生成分过冷区,并提供了激活成分过冷区内形核质点的驱动力,从而抑制晶粒长大,促进形核而达到一定的晶粒细化效果.

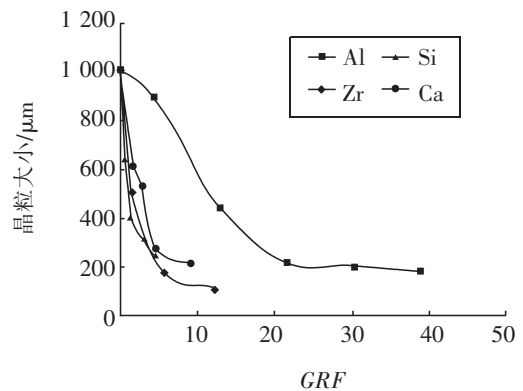


图9 镁合金晶粒大小与生长限制因子(GRF)的关系图<sup>[14]</sup>

原子半径较大的 Ca,几乎不溶于  $\alpha\text{-Mg}$  中,在加入 Mg-6Zn-2Al 合金后主要分布于晶界,并阻碍

了晶界附近锌、铝原子向基体中扩散,造成了晶界附近锌、铝原子浓度的增加,同时Ca加入后引起的溶质浓度改变导致了晶界相发生了变化,主要是抑制 $Mg_{51}Zn_{20}$ 相的析出,并代之形成了含Ca的MgZn相和 $\tau$ 相,以及少量的Mg-Zn-Al-Ca四元化合物.而形成相同摩尔分数的MgZn相和 $\tau$ 相所消耗的Zn,Al原子数要比形成同摩尔分数的 $Mg_{51}Zn_{20}$ 相消耗的溶质原子要多.这使得基体中锌、铝原子浓度的减小,导致 $\alpha$ -Mg基体显微硬度降低(见图10).

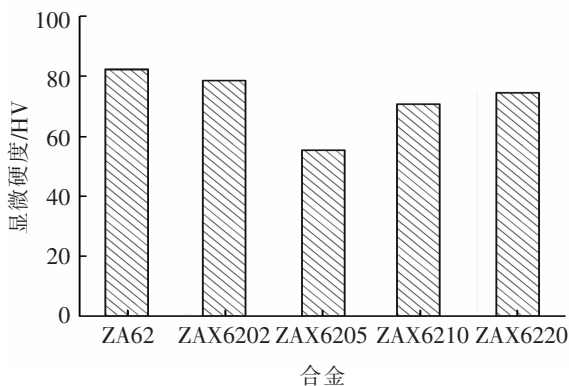


图10 加入不同含量Ca后合金基体的显微硬度值

由Hall-Petch公式<sup>[14]</sup>: $\sigma_y = \sigma_0 + Kd^{-1/2}$ ,式中, $\sigma_y$ 为材料屈服强度, $\sigma_0$ 为相当于单晶体的屈服强度, $K$ -表征晶界强度影响程度的系数, $d$ 为晶粒平均直径.减小晶粒尺寸可使合金屈服强度提高.本文中随Ca加入量的增加,虽然晶粒得到了细化,但组织中出现了新的含Ca化合物相,这些化合物可能更易割裂基体,降低了合金形变能力,并且新相内部和其与基体的界面处容易出现裂纹,同时加入Ca降低了Al,Zn原子在基体中的固溶度,从而削弱了溶质原子对 $\alpha$ -Mg基体固溶强化的作用,所以反而导致了合金室温拉伸强度和塑性大幅下降,而淡化了晶粒细化作用的效果.沿晶界分布的MgZn相和 $\tau$ 相熔点分别为347℃和393℃,都高于 $Mg_{51}Zn_{20}$ 相熔点(341℃),并且Ca的溶入可能会进一步提高其高温稳定性.虽然现在还没有关于本文中四元Mg-Zn-Al-Ca相的报道,但通过合金固溶后显微组织的观察,在经过345℃下长时间的处理后,该相仍然没有发生显著溶解,这显示了其同样具有很高的热稳定性.这些含Ca热稳定中间相

在晶界处连续或半连续分布使得高温下晶界处溶质扩散速度降低,对晶界的滑移起到的阻碍作用.因此Ca的加入改善了合金高温拉伸和蠕变性能.高温下,合金蠕变过程同样受到了晶粒尺寸的影响,根据扩散蠕变和晶界滑动蠕变机制,晶粒越小,晶界数量越多,增加的晶界表面积促进了晶界的滑移,而这种情况下晶界处的第二相也很难对晶界起到有效钉扎作用,从而增加了蠕变变形量.所以较高的蠕变温度下细晶粒组织导致了合金蠕变性能的降低.

### 3 结论

1)Mg-6Zn-2Al-0.3Mn铸造镁合金的显微组织主要由 $\alpha$ -Mg基体和致密片状 $Mg_{51}Zn_{20}$ 共晶相组成.

2)Ca加入后抑制了 $Mg_{51}Zn_{20}$ 相的析出,并代之形成了含Ca的MgZn相和 $\tau$ 相,以及一种热稳定的四元Mg-Zn-Al-Ca相.随着Ca加入量的增加( $w(Ca) > 0.5\%$ ),合金晶粒显著细化.晶间相的数量增加,合金组织中的第二相趋于形成空间网状结构.

3)Ca合金化后,合金常温拉伸强度和塑性呈下降趋势,合金基体显微硬度减小.少量Ca的加入,提高了合金高温拉伸强度.Ca的加入改善了合金蠕变性能,在150℃/70MPa条件下,合金抗蠕变性能随Ca含量的增加而提高,而175℃/70MPa条件下,合金蠕变性能主要受合金晶粒尺寸影响,随晶粒尺寸的减小蠕变变形量增加.

### 参考文献:

- [1] Park K C, Kim B H, Jo S M, et al. Mechanical and creep properties of the cast magnesium alloy[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 152/154(1):1207-1210.
- [2] Pantelakis S P G, Alexopoulos N D, Chamos A N. Mechanical performance evaluation of cast magnesium alloys for automotive and aeronautical applications[J]. Journal of Engineering Materials and Technology, 2007, 129 (3):422-431.
- [3] Pekguleryuz M, Celikin M. Creep resistance in magnesium alloys[J]. International Materials Reviews, 2010, 55(4):

- 197-217.
- [4] Nakajima T, Takeda M, Endo T. Strain enhanced precipitate coarsening during creep of a commercial magnesium alloy AZ80[J]. *Materials Transactions*, 2006, 47(4):1098-1104.
- [5] Kim D H, Lee J Y, Lim H K, et al. Effect of Al addition on the elevated temperature deformation behavior of Mg-Zn-Y alloy[J]. *Materials Science and Engineering A:Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 2008, 487(1/2):481-487.
- [6] Bamberger M, Dehm G. Trends in the development of new Mg alloys[J]. *Annual Review of Materials Research*, 2008, 38(1):505-533.
- [7] Chen Jihua, Chen Zhenhua, Yan Hongge, et al. Microstructural characterization and mechanical properties of a Mg-6Zn-3Sn-2Al alloy[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, 467(1/2):1-7.
- [8] Mukai T, Yamanoi M, Watanabe H, et al. Effect of grain refinement on tensile ductility in ZK60 magnesium alloy under dynamic loading[J]. *Materials Transactions*, 2001, 42(7):1177-1181.
- [9] Wei L Y, Dunlop G L, Westengen H. The intergranular microstructure of cast Mg-Zn and Mg-Zn-rare earth alloys [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1995, 26(8):1947-1955.
- [10] 杨光昱, 介万奇, 郝启堂. Mg-xCa-5Zn-3Al-0.2Mn 镁合金砂型铸造组织和力学性能研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2006, 35(2):217-222.
- [11] Higashi I, Shiotani N, Uda M, et al. The crystal structure of  $Mg_{51}Zn_{20}$  [J]. *Journal of Solid State Chemistry*, 1981, 36(2):225-233.
- [12] Bergmann G, Waugh J L T, Paung L. The crystal structure of the metallic phase  $Mg_{32}(Al, Zn)_{49}$  [J]. *Acta Crystallographica*, 1957, 10(1):254-259.
- [13] 刘楚明, 朱秀荣, 周海涛. 镁合金相图集[M]. 长沙:中南大学出版社, 2006:62-63.
- [14] 袁广银, 刘满平, 王渠东. Mg-Al-Zn-Si 合金的显微组织细化[J]. *金属学报*, 2002, 38(10):1105-1108.
- [15] 闵学刚, 孙扬善, 袁广银, 等. Bi, Sb, Ca 和 Si 对 AZ91 合金的组织 and 性能的影响[J]. *中国有色金属学报*, 2002, 12(铝合金专辑):166-171.

(责任编辑:仇慧)