

文章编号:1673-9981(2009)04-0234-05

# SiC 对等温热处理 AZ91D 镁合金组织的影响

王瑞权, 姜向东

(兰州理工大学材料科学与工程学院, 甘肃 兰州 730050)

**摘 要:**对经 SiC 变质处理的 AZ91D 镁合金的铸态组织及其在半固态等温热处理过程中组织的变化进行了研究. 结果表明, 该合金的微观组织在等温热处理过程中经历了四个阶段, 初期的快速粗化阶段、组织分离阶段、晶粒球状化阶段和最后的粗化阶段; 随着等温时间的延长, 未变质处理的镁合金的组织由树枝晶状变成近球状, 经变质处理的镁合金组织由等轴晶变成细小的球状, 继续延长等温时间, 二者的组织均逐渐地合并长大.

**关键词:**AZ91D 合金; SiC; 变质处理; 等温热处理  
**中图分类号:** TG146.2 **文献标识码:** A

轻量化的要求使镁合金在汽车、航空航天及电讯等行业中得到广泛地应用<sup>[1-4]</sup>. 目前, 压铸法是镁合金成型的主要方法之一, 半固态压铸法具有成形件力学性能良好、充型平稳、能量消耗低及模具使用寿命长等特点, 成为研究的热门<sup>[5]</sup>. 众所周知, 细化晶粒对镁合金铸件性能的提高起着至关重要的作用. 细化晶粒能降低缩松、使第二相弥散强化, 提高铸件的机械性能和气密性; 改善铸件的耐蚀性能及加工性能; 缩短晶间相(如  $Mg_{17}Al_{12}$  相)固溶所需的扩散距离, 提高热处理的效率<sup>[5]</sup>. 普通的压铸镁合金晶粒比较粗大、铸件性能较差, 加入 SiC 对晶粒进行细化处理, 能改善第二相的形态及分布状况, 是生产高性能优质镁合金铸件最为有效的方法.

半固态等温热处理法是最近发展起来的一种制

备半固态非枝晶组织合金的方法<sup>[6-9]</sup>, 该方法工艺过程简单、成本低廉. 本文采用半固态等温热处理法, 对经 SiC 细化处理的 AZ91D 镁合金在半固态等温热处理中组织的演变进行了研究, 同时探讨了组织演变的机理.

## 1 试验部分

### 1.1 材 料

试验材料为商用 AZ91D 镁合金铸锭, 其成分列于表 1.

### 1.2 方 法

首先将合金在 GDJX-0405 型电阻炉中重熔, 然

表 1 AZ91D 镁合金的化学成分  
Table 1 Chemical composition of AZ91D magnesium alloy

化学成分	Al	Zn	Mn	Si	Cu	Ni	Fe	Mg
w/%	8.92	0.75	0.21	0.1	0.03	0.002	0.005	余量

收稿日期: 2009-01-21

作者简介: 王瑞权(1983—), 男, 河南南阳人, 研究生.

后进行精炼,精炼剂选用  $\text{C}_2\text{Cl}_6$ ,精炼温度为  $710\text{ }^\circ\text{C}$ ,精炼保温时间为  $10\text{ min}$ ,精炼后再进行变质处理的试样,从试样上截取  $12\text{ mm}\times 10\text{ mm}$  的试样,将它放入  $\text{SRJ}\times 45$  型箱式电阻炉中进行等温处理,等温处理温度为  $580\text{ }^\circ\text{C}$ ,保温时间分别为  $5, 10, 20, 30, 60$  和  $90\text{ min}$ ,用  $\text{DWK-702}$  型温控仪控制温差为  $\pm 1\text{ }^\circ\text{C}$ ,控温时测温热电偶与试样的表面相接触,以减少测温误差,在试样放入电阻炉中的同时开始计时,达到保温时间后立即水淬取样,用质量分数为  $4\%$  的  $\text{HNO}_3$  溶液腐蚀处理试样,用  $\text{MEF-3}$  型金相显微镜观察试样组织的变化,为了便于比较,对未经变质处理的常规

铸态 AZ91D 镁合金也进行了等温热处理。

## 2 结果及讨论

### 2.1 铸态组织特征

通过  $\text{Mg-Al}$  合金相图可知, AZ91D 镁合金的铸态组织由  $\alpha\text{-Mg}$  相及晶间化合物  $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$  相组成。图 1 为 AZ91D 镁合金的铸态 SEM 照片。从图 1(a) 可见,未经变质处理的合金铸态组织  $\alpha\text{-Mg}$  初生相以发达的树枝晶形态存在,二次枝晶臂长而粗大,

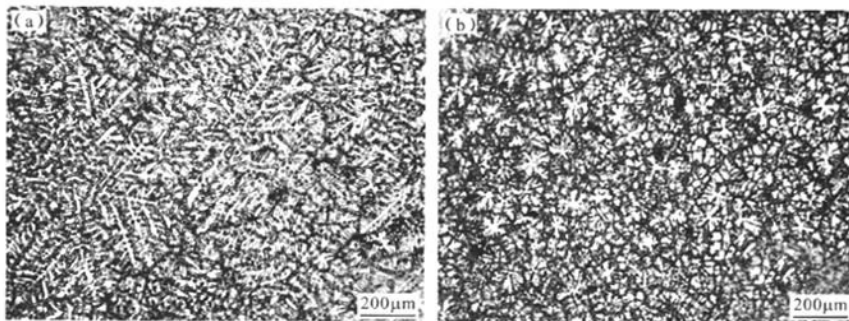


图 1 合金的铸态 SEM 照片

(a)未变质处理; (b)变质处理

Fig. 1 OM of As-cast microstructure of AZ91D magnesium alloy

二次枝晶臂间距也较大;从图 1(b) 可见,经变质处理后的合金铸态组织的二次枝晶臂变得短而密,其间距也显著减小,晶粒变成近似的等轴晶,而且细小均匀。

### 2.2 等温热处理时间的影响

在加热初期,初生晶粒间共晶组织向初生晶内溶入,使晶界处的共晶组织迅速减少,造成二次枝晶臂的快速合并及晶粒间的合并,从而使合金组织变为少晶界的相互连接的组织。图 2 为不同等温热处理时间下未经变质处理的 AZ91D 镁合金显微组织。从图 2 可见,当等温时间为  $5\text{ min}$  时,液相开始增多,原先相互连接的组织变为粗大且形状不规则的块状固相颗粒(图 2(a));随着等温时间延长,大块状晶粒开始分离,组织开始具有明显的球化趋势,但是部分晶粒还十分粗大(图 2(b));随着等温时间的继续延长,粗大的块状固相颗粒开始分离并形成不

规则组织,不同部位的曲率不同,因而熔点也不同,熔点较低的部位优先熔化,不规则组织趋于圆整(图 2c);当等温时间为  $30\text{ min}$  时,组织基本完成分离,大小、形状趋于均匀化、圆整化(图 2(d));随着等温时间延长至  $60\text{ min}$  时,晶粒组织较均匀地分布于液相中,为圆整的球状组织,大小也较均匀,粒径一般为  $100\sim 220\text{ }\mu\text{m}$  (图 2(e));当等温时间达到  $90\text{ min}$  时,晶粒形状逐渐变得不规则,颗粒大小也不均匀(图 2(f))。

图 3 为在不同等温热处理时间下经变质处理的 AZ91D 镁合金的显微组织。从图 3 可见,等温热处理初期,显微组织呈细小的不规则粒状,随着等温热处理时间的延长,组织由细小的粒状转变为细小的球状,然后再粗化。经变质处理后的试样在半固态等温热处理过程中,其组织演化的进度明显加快,保温  $10\text{ min}$  时的晶粒形状与未经变质处理时  $30\text{ min}$  的

相近,但晶粒细小得多;当等温时间为 30 min 时,组织已全部为细小圆整的球状;当时间为 60 min 时,组织已表现出长大的趋势,90 min 时组织已明显长大,但在界面曲率的作用下仍保持圆整。

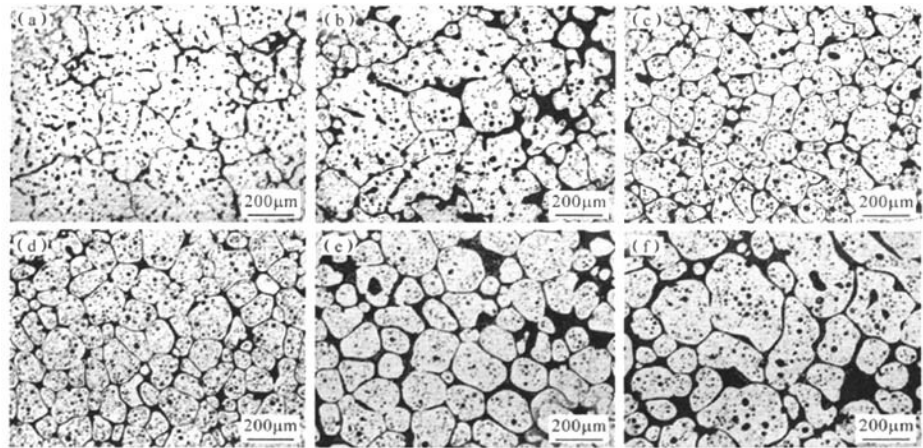


图 2 不同等温热处理时间下未变质处理的 AZ91D 镁合金显微组织的演化

Fig.2 The structure evolution of AZ91D alloy without modification at 580°C during isothermal heat treatment  
(a)5min; (b)10min; (c)20min; (d)30min; (e)60min; (f)90min

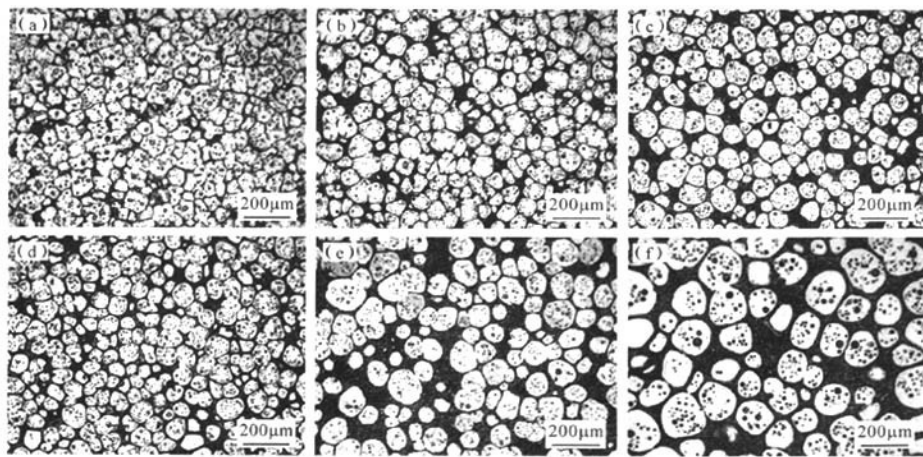


图 3 经变质处理的 AZ91D 镁合金组织的演化

Fig.3 Structure evolution of modified AZ91D alloy  
(a)5min; (b)10min; (c)20min; (d)30min; (e)60min; (f)90min

对未变质处理和变质处理试样组织的分析可以发现,在半固态等温热处理过程中它们组织的演变是不同的,未经变质处理镁合金的组织由最初的粗大树枝晶和二次枝晶臂合并成为大块状,而后在液

相及固液界面曲率的作用下在大块状晶内部及晶界处熔化分离为小块状,继续保温则逐渐趋于圆整,当保温时间过长时,又会发生晶粒的合并以及小晶粒熔化、大晶粒长大的现象。

经 SiC 变质处理镁合金的组织先是等轴晶在某取向的枝晶发生合并,成为颗粒状晶,然后它在升温过程中逐渐分离细化,在半固态等温热处理中合金组织演变过程如图 4 所示<sup>[10]</sup>。

半固态等温热处理时间对 AZ91D 镁合金初生相形态及尺寸的影响列于表 2。由表 2 可知,随等温时间的延长,合金组织发生如下转变:未变质处理的由树枝晶组织→大块状→碎块颗粒→球状→长大,经变质处理的由等轴晶组织→块状→碎块颗粒→球化→长大;在 20 min 前分离占主导,在 20~60 min 范围内基本保持平衡,60 min 后合并占主导。

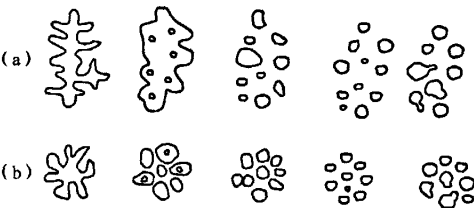


图 4 半固态等温热处理中组织演变过程的示意图

(a)未变质处理;(b)SiC 变质处理

Fig.4 Schematic illustration of structure evolution during semi-solid isothermal heat treatment

(a)microstructure non-modified;

(b)microstructure modified with SiC

表 2 不同等温时间下 AZ91D 镁合金最初 α 相的形态及颗粒尺寸

Table 2 Morphology and size of primary α-phase of AZ91D alloy during different holding time

处理情况	等温时间/ min	形态	颗粒尺寸/ μm
未变质处理	5	大块状	250~300
	10	大块状+粒状	200~300
	20	粒状+大球状	100~200
	30	近球状	80~180
	60	大球状	100~220
	90	近球状+块状	130~280
变质处理	5	小粒状	42~80
	10	小粒状	37~83
	20	球状	34~79
	30	小球状	35~76
	60	球状	57~103
	90	大球状	69~138

3 结 论

(1) 经 SiC 变质处理的 AZ91D 镁合金的组织与未经变质处理的相比,非枝晶半固态组织更细,其演变速率更快,圆整度更高。

(2) 在 580 ℃、等温热处理 20~30 min 条件下,经 SiC 变质处理的 AZ91D 镁合金,可获得非常理想的半固态非枝晶组织。

(3) 随着等温时间的延长,合金组织发生转变:未变质处理的由粗大树枝晶→大块状→碎块颗粒→球化→长大;经变质处理的由细小等轴晶→块状→碎块颗粒→球化→长大;在 20 min 前分离占主导,20~60 min 基本保持平衡,60 min 后合并占主导。

参考文献:

[1] COLE G S. Issues that influence magnesium use in the automotive industry[J]. Materials Science Forum, 2003, 419-422(1): 43-50.

[2] KANEKO T, SUZUKI M. Automotive applications of magnesium alloys[J]. Materials Science Forum, 2003, 419-422(1): 67-72.

[3] MORDIKE B L, EBERT T. Magnesium properties-application-potential[J]. Materials Science & Engineering, 2001, A302(1): 37-45.

[4] KLEINER S, BEFFORT O. Microstructures and mechanical properties of squeeze cast and mi-solid cast Mg-Al alloys[J]. Journal of Light Metals, 2002, 2(4): 277-280.

[5] 刘子利, 沈以赴, 李子全, 等. 铸造镁合金的晶粒细化技术[J]. 材料科学与工程学报, 2004, 22(1): 146-149.

[6] 朱鸣芳, 苏华钦. 半固态等温热处理制备粒状组织 ZA12 合金的研究[J]. 铸造, 1996(4): 1-5.

[7] 许广济, 陆松, 陈体军, 等. 硼、钛对半固态 ZA27 组织演变的影响[J]. 甘肃工业大学学报, 2000, 26(1): 19-22.

[8] 李元东, 郝远, 金玉花, 等. 半固态等温热处理对 AZ91D 镁合金组织的影响[J]. 甘肃工业大学学报, 2001, 27(1): 27-30.

[9] FLEMINGS M C. Behavior of metal alloys in the semi-solid state[J]. Metall Trans A, 1991, 22A(5): 957-981.

[10] 李元东, 郝远, 阎峰云, 等. AZ91D 镁合金在半固态等温热处理中的组织演变[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11(4): 572-574.



## Effects of SiC on microstructure of AZ91D alloy during isothermal heat treatment

WANG Rui-quan, JIANG Xiang-dong

(School of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** The as-cast structure of Mg-alloy AZ91D treated with modifier SiC and the structural evolution during semisolid isothermal heat treatment were investigated. The results show that the microstructure of AZ91D alloy experienced four stages during isothermal heat treatment process: the initial rapid coarsening, structure separation, grain spheroidization and the final coarsening. With the extension of isothermal heat treatment, the microstructure of non-modified magnesium alloy will change from dendrite to quasi-spherical grains, while the microstructure of the modified magnesium alloy will change from dendrite to the small spherical grains, these quasi-spherical grains and small spherical grains will merger and grow up gradually as it continues to extend the time of isothermal heat treatment.

**Key words:** AZ91D alloy; SiC; modification; isothermal heat treatment

## 广东省稀土开发及应用研究重点实验室

广州有色金属研究院稀有金属研究所紧紧围绕着广东省及国家稀土重大战略需求和世界科学发展前沿开展工作。经过30多年的努力,在稀土矿产资源开发、稀土冶金分离、稀土功能材料、稀土农用等领域取得了显著成就,形成了一些在省内外具有优势和特色的研究方向。2009年经广东省科技厅批准依托该研究所建立了广东省稀土开发及应用研究重点实验室。

现任实验室主任肖方明教授,学术委员会由中科院院士苏锵教授、工程院院士张国成教授等国内知名的专家学者组成。实验室现有固定人员38人,其中教授级高级工程师6人,高级工程师16人,拥有博士和硕士学位者21人,中青年占80%以上。

近五年来实验室共计获省部级科技奖励12项,承担了国家、省市纵向课题和横向课题30多项;申请发明和实用新型专利25项,获得授权14项;发表了相关论文100多篇。目前该实验室正承担及参与的项目有国家“科技支撑计划”项目2项,国家“863”科技计划项目1项,广东省、广州市粤港招标、国际合作、科技攻关等项目10项,以及一大批横向科研合作项目。

实验室主要研究方向为:稀土低品位复杂矿的绿色冶金工艺、稀土二次资源再生利用技术、稀土固体发光材料及应用、稀土储氢材料及应用、稀土磁性材料及应用、纳米稀土功能粉体及应用、稀土应用技术开发及产品性能检测等。

稀土开发及应用研究重点实验室将以开发及应用技术相结合为特色,对稀土开发及应用方面存在的关键技术、共性技术、高新技术等问题进行应用基础理论、应用技术和工程化技术方面开展研究。建设成为省内乃至国内一流水平的稀土开发及应用研究产学研合作的创新平台,成为广东省稀土开发及应用科研成果、关键工艺技术和装备的孵化器,成为培养、稳定、聚集高层次稀土科技人才的创新基地。为广东省稀土的高效应用、循环利用和清洁化生产不断提供综合开发的创新技术和产业化技术,增创广东科技发展的新优势,为广东省的经济高速发展和环保节能做出贡献。

联系人:肖方明

联系电话:020-37238536 传真:020-37238406