T4 热处理对石膏型 AZ91 铸造镁合金组织和性能的影响

张艳平，黄静，陶健全，万元元
（西南技术工程研究所，重庆 400039）

摘要： 用石膏型熔模铸造技术，成功制备了 AZ91 镁合金铸件。用金相显微镜（OM）、扫描电镜（SEM）、能谱（EDS）以及电子万能实验机等，研究了 AZ91 镁合金铸态及 T4 热处理态的显微组织演变和力学性能。结果表明，分布在铸态 AZ91 镁合金晶界的网状 β-$Mg_{17}Al_{12}$ 相在 T4 热处理过程中逐渐溶解，铸态和 T4 热处理态中均存在大量的 Al_8Mn_5 化合物，T4 处理后，其力学性能显著提高。

关键词： AZ91 镁合金；T4；显微组织；力学性能
DOI： 10.3969/j.issn.1674-6457.2013.04.005
中图分类号： TG115.2 **文献标识码：** A **文章编号：** 1674-6457(2013)04-0020-03

Effect of T4 Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of AZ91 Alloys Prepared by Plaster Casting

ZHANG Yan-ping, HUANG Jing, TAO Jian-quan, WAN Yuan-yuan
(Southwest Technology and Engineering Research Institute, Chongqing 400039, China)

Abstract: AZ91 magnesium alloy castings were successfully prepared by plaster casting technique. The microstructure evolution and mechanical properties of AZ91 magnesium alloys with cast and T4 heat treatment were studied by optical microscopy (OM), scanning electron microscopy (SEM), EDS and electronic universal testing machine. It is indicated that the reticular β-$Mg_{17}Al_{12}$ phase in the grain boundary of casting AZ91 alloy gradually dissolved during T4 heat treatment process. In the microstructures of cast and T4 treatment AZ91 alloy, lots of Al_8Mn_5 phase were found. The mechanical performance of AZ91 alloy is significantly improved by T4 heat treatment process.

Key words: AZ91 magnesium alloy; T4; microstructure; mechanical properties

镁合金具有低密度、高的比强度和比刚度及减震性能，还有优良的铸造性和加工性。目前，镁合金铸件主要由压铸和砂铸工艺制造，关于采用镁合金石膏型熔模铸造的报道很少。AZ91 镁合金是较为廉价的商业镁合金，已广泛应用于航空、航天、交通、3C 等领域[1]。王开等[2]研究了 AZ91 镁合金触变铸造件热处理前后的组织与性能。马颖等[3]研究了金属型铸造 AZ91 镁合金热处理前后的组织及力学性能。文中采用石膏型熔模铸造技术制备 AZ91 镁合金铸件，研究了 T4 热处理前后 AZ91 镁合金铸件的显微组织和力学性能。

1 实验

实验材料为 AZ91 镁合金，其化学成分见表 1。石膏铸型的主要成分为：α-石膏（27%，质量分数）+铝矾土熟料（70%）+防燃剂（3%）。镁合金熔体精炼温度为 740 ℃，精炼剂为 RJ-5 熔剂，加入量约为

收稿日期： 2013-05-27
作者简介： 张艳平（1987-）女，湖北荆州人，在读硕士，主要研究方向为兵器工程。

1.5%,精炼时间为 5 ~ 8 min。石膏铸型出炉温度为 300 ℃,熔体浇注温度为 720 ℃,浇注时间为 25 ~ 30 s。浇注前,向型腔通入 SF_6 气体。石膏型熔模铸造成形的 AZ91 镁合金拉伸试杆如图 1 所示。

表 1　实验合金的化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of experimental alloy

%

Al	Zn	Mn	Si	Fe	Cu	Ni	Mg
9.55	0.65	0.15	0.10	0.005	0.03	0.002	余量

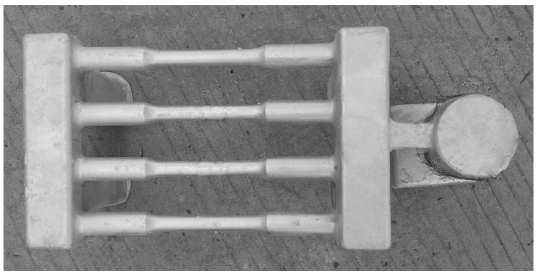


图 1　石膏型熔模铸造成形的 AZ91 镁合金标准拉伸试杆

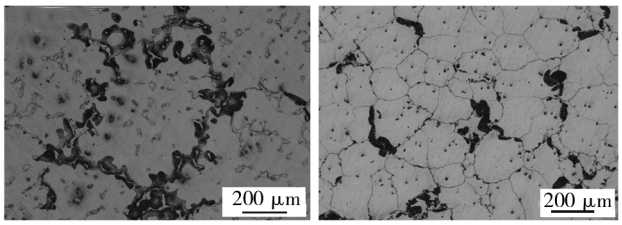
Fig. 1 The standard tensile test bars of AZ91 alloys by plaster casting technique

AZ91 镁合金试样及拉伸试杆的 T4 热处理工艺为 360 ℃×2 h+415 ℃×20 h,空冷。截取热处理前后的试样,打磨、抛光后,并用体积分数为 4% 的 H_3PO_4 酒精溶液腐蚀,用 OM,SEM,EDS 分析微观组织结构。采用电子万能试验机测定其抗拉强度、屈服强度和伸长率。

2　结果与讨论

2.1　微观组织结构

AZ91 镁合金铸件热处理前后的金相显微组织(OM)如图 2 所示。石膏型熔模铸造 AZ91 镁合金铸态组织由 α-Mg 固溶体和晶界不连续的呈网状分布的 β-$Mg_{17}Al_{12}$ 共晶相组成。图 2a 中的 α 初生相颗粒和二次凝固 α 相是 Al 和 Zn 在 Mg 中的固溶体,与 Mg 具有相同的晶体结构,共晶组织分布在 α 相颗粒周围。另外,在 α 相颗粒中间包裹着细小的圆形共晶组织,因此在凝固过程中就在 α 相颗粒中间形成共晶组织。镁合金试样经过 T4 热处理后(如图 2b 所示),β-$Mg_{17}Al_{12}$ 相大量溶解,只在晶界处仍发现有少量的 β-$Mg_{17}Al_{12}$ 相存在。

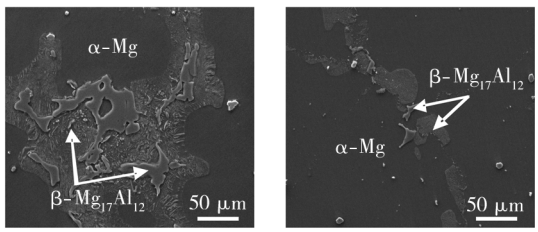


a　铸态　　b　T4热处理态

图 2　AZ91 镁合金金相显微组织

Fig. 2 Optical microstructures of AZ91 alloy

AZ91 镁合金铸件热处理前后的 SEM 形貌如图 3 所示。铸态中第二相颗粒粗大,呈骨骼状,片层状和颗粒状大量分布于晶界。经 T4 热处理后,第二相尺寸显著变小,但仍呈骨骼状、片层状和细小颗粒分布。这说明 T4 热处理能改变第二相的含量,对第二相的形态及分布影响较小。



a 铸态　　b　T4热处理态

图 3　AZ91 镁合金 SEM 形貌

Fig. 3 SEM micrographs of AZ91 alloy

有研究表明[4-5]:镁合金在固溶处理过程中,β-$Mg_{17}Al_{12}$ 相分解,大量 Al 以置换原子形式进入 α-Mg 基体中,固溶处理后晶粒中的 Al 原子并未达到完全均匀的分布,Al 含量会呈现从晶界向晶粒中心递减的摩尔浓度梯度。通过 EDS 分析发现,AZ91 镁合金铸态和 T4 热处理态中,溶质元素 Al,Zn 的含量也呈现从晶界向晶粒中心递减的趋势。从晶界到晶粒中心溶质元素 Al,Zn 的分布趋势如图 4 所示。从晶界到晶粒中心,Al,Zn 元素的含量均逐渐降低。在晶界处,铸态中 Al,Zn 元素的含量均比 T4 热处理后的含量高,但 T4 处理后的晶粒中心,Al,Zn 元素的含量明显增加。说明 T4 热处理过程中,溶质元素逐渐从晶界向晶粒中心扩散。

从图 3 可以看出,在 AZ91 镁合金铸件 T4 热处理前后的组织中均存在高亮度、颗粒状的化合物。将图 5 中的白色颗粒状化合物经能谱分析发现含

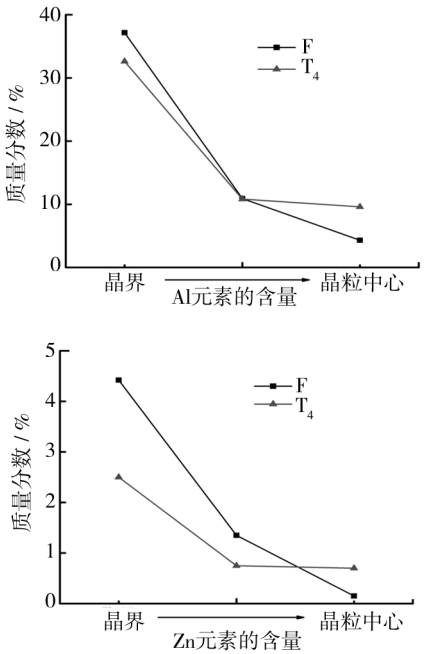


图 4 溶质元素 Al,Zn 的分布

Fig. 4 The distribution of solute elements Al, Zn

Mg 55.78%(质量分数),Al 32.5%,Mn 11.37%,能谱分析结果如图 5 所示。可以证明此相为富 Mn 化合物。有研究表明,在 AZ 系铸造镁合金中均含有富 Mn 化合物[6-8],认为在 AZ 系镁合金铸态组织中,Mn 与 Al 结合形成 Al_8Mn_5 相,在固溶处理过程中仍稳定存在。从图 3 可以看出,石膏型 AZ91 铸造镁合金铸态组织和 T4 热处理态组织中均含有弥散分布的颗粒状 Al_8Mn_5 相。

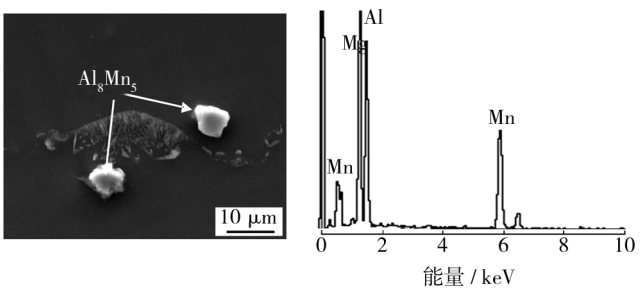


图 5 Al_8Mn_5 化合物 SEM 形貌及 EDS 图谱

Fig. 5 SEM micrographs and EDS results of the Al_8Mn_5 phase

2.2 室温力学性能

AZ91 镁合金在不同热处理状态下的室温力学性能见表 3,可以看出,经 T4 热处理后,其抗拉强度和伸长率分别提高 43% 和 220%。石膏型熔模精密铸造成形的 AZ91 合金是由 α-Mg 固溶体和晶界不连续的呈网状分布的 β-$Mg_{17}Al_{12}$ 共晶相组成,而合金中的 β-$Mg_{17}Al_{12}$ 相是易碎相。在变形过程中成为断裂源,会极大影响铸件的力学性能,因此,当铸件没有铸造缺陷时,β-$Mg_{17}Al_{12}$ 相的体积分数和空间分布状态就决定了试样的力学性能。通过 β-$Mg_{17}Al_{12}$ 体积分数的降低和细化弥散能够提高合金的延展性。

表 2 AZ91 镁合金室温力学性能

Table 2 Mechanical properties of AZ91 alloy at room temperature

状态	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%
F	187	108	2.5
T4	268	99	8.0

AZ91 镁合金经固溶处理后,固溶体中的溶质原子(Al,Zn 元素)将处于过饱和状态,处于非平衡状态,在室温或某一温度下溶质原子仍具有一定的扩散能力。随着时间的延续,过饱和固溶体中的溶质原子将发生脱溶析出。415 ℃下长时间保温,Al,Zn 元素逐渐向基体中固溶。β-$Mg_{17}Al_{12}$ 体积分数明显降低,β-$Mg_{17}Al_{12}$ 粗大颗粒逐渐细化(如图 3 所示)。细小的 β-$Mg_{17}Al_{12}$ 相和大量固溶于基体中的溶质原子(Al,Zn)起到弥散强化和固溶强化效果,因此,T4 热处理后,AZ91 镁合金的力学性能明显得到提高。

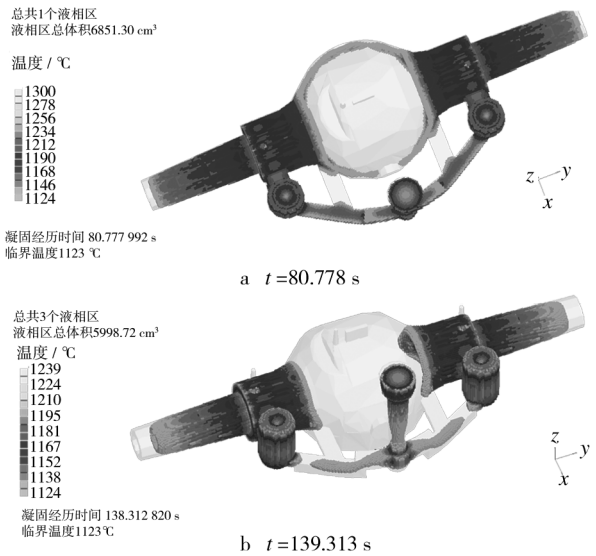
3 结语

1) 铸态 AZ91 镁合金的组织由 α-Mg 固溶体、β-$Mg_{17}Al_{12}$ 及 Al_8Mn_5 相组成,其中 β-$Mg_{17}Al_{12}$ 具有不同的形态,主要沿晶界以不规则的形状呈网状分布。

2) T4 热处理后,AZ91 镁合金中 β-$Mg_{17}Al_{12}$ 相发生分解,Al,Zn 原子以置换固溶的形式进入到 α-Mg 基体中,β-$Mg_{17}Al_{12}$ 相变得弥散细小,Al_8Mn_5 相仍稳定存在。

3) 经 T4 处理以后,AZ91 镁合金试样的抗拉强度和断后伸长率分别提高 43% 和 220%,屈服强度略有降低。

(下转第 26 页)

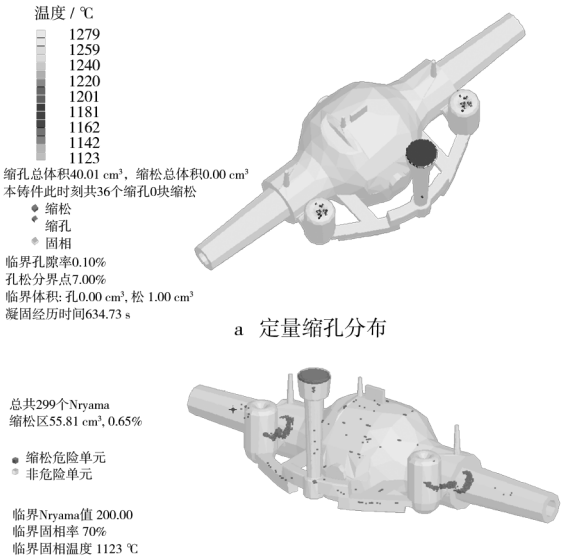


a t =80.778 s

b t =139.313 s

图 6 铸件改进工艺方案下的固液相分布

Fig. 6 The liquid phase distribution of the improved casting process



a 定量缩孔分布

b Niyama缩松分布

图 7 铸件改进工艺方案下的缩孔、缩松分布

Fig. 7 The shrinkage cavity and shrinkage porosity distribution of the improved process

4 结语

利用华铸 CAE 软件模拟球铁后桥壳的充型及凝固过程，可以预测铸件中产生缩孔、缩松缺陷的危险区域。通过工艺改进，能有效地消除缩孔、缩松缺陷，为铸造工艺设计者提供有效的参考依据。

参考文献：

[1] 柳百成. 铸件凝固过程的宏观及微观模拟仿真研究进展[J]. 中国工程科学，2000，2(9)：29-37.

[2] 熊守美，许庆彦，康进武. 铸造过程模拟仿真技术[M]. 北京：机械工业出版社，2004.

[3] 王文清，李魁盛. 铸造工艺学[M]. 北京：机械工业出版社，2002.

[4] 陈立亮，刘瑞祥. 华铸 CAE/InteCAST 集成系统使用手册[M]. 武汉：华中科技大学华铸软件中心，2006.

[5] 钱怡君. CAE 技术在改善球墨铸铁轮毂缩孔中的应用[J]. 铸造技术，2011，32 (11)：1505-1508.

(上接第 22 页)

参考文献：

[1] 陈强. 合金加工流变学及其应用[M]. 北京：冶金工业出版社，2012.

[2] 王开，刘昌明，翟彦博. AZ91D 镁合金触变铸造件热处理前后的组织与性能[J]. 特种铸造及有色合金，2008，28(1)：28-30.

[3] 马颖，潘振峰，张洪锋，等. 热处理对 AZ91D 镁合金组织及力学性能的影响[J]. 兰州理工大学学报，2009，35(5)：9-12.

[4] 时惠英，陈梓山，张菊梅，等. 时效处理 AZ61 铸态镁合金中孪晶的形成机理[J]. 特种铸造及有色合金，2009，29(9)：867-870.

[5] 许娟，李鹏飞，郭锋. 热处理对 AZ91D 镁合金相结构的影响[J]. 材料热处理学报，2011，32(4)：30-33.

[6] SONG Guang-ling，XU Zhen-qing. Effect of Microstructure Evolution on Corrosion of Different Crystal Surfaces of AZ31 Mg Alloy in a Chloride Containing Solution[J]. Corrosion Science，2012，54：97-105.

[7] WANG Y，XIA M，FAN Z，et al. The Effect of Al8Mn5 Intermetallic Particles on Grain Size of As-cast Mg-Al-Zn AZ91D Alloy[J]. Intermetallics，2010，18：1683-1689.

[8] 田学锋，樊自田，黄乃瑜. 热处理对消失模铸造 AZ91-0.6MM-0.5Cd 合金组织及力学性能的影响[J]. 铸造，2008，57(3)：226-229.