DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2019.10.010

镁合金半固态差异化演变方式与行为机理

王瑞权[1],邱葭菲[1],程勤华[1],陈云祥[1],黄海军[2]

(1. 浙江机电职业技术学院 材料技术系,浙江 杭州 310053;2. 上海交通大学 材料科学与工程学院,上海 200030)

摘　要:研究了经 $MgCO_3$ 细化处理后的 AM60B 镁合金在 610 ℃半固态等温热处理过程中的微观组织演化。结果表明,镁合金原始组织晶粒大小不同,其半固态演变方式有很大差异;粗大晶粒演化过程包括最初的树枝晶、枝晶合并、溶质扩散、晶粒块状化和最后的球化五个阶段;对于细小晶粒,一颗原始细小等轴晶一般最终形成一个初生 α 晶粒。

关键词:AM60B 合金;晶粒细化;铸态微观组织;半固态微观结构

中图分类号:TG146.2; TG249　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2019)10-1064-04

Differential Evolution Patterns and Behavior Mechanisms of Semi-solid Magnesium Alloys

WANG Ruiquan[1], QIU Jiafei[1], CHENG Qinhua[1], CHEN Yunxiang[1], HUANG Haijun[2]

(1. Department of Materials Technology, Zhejiang Institute of Mechanical and Electrical Engineering, Hangzhou 310053, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: The microstructural evolution of AM60B magnesium alloy refined by $MgCO_3$ during 610 ℃ semi-solid isothermal heat treatment was studied. The results show that the semi-solid evolution mode of magnesium alloys varies greatly with the grain size of the original microstructure. The evolution of coarse grains includes five stages: the initial dendrites, dendrite consolidation, solute diffusion, grain bulk formation and spheroidization. For fine grains, a primitive fine equiaxed grain generally eventually forms a primary alpha grain.

Key words: AM60B alloy; grain refinement; as-cast microstructure; semisolid microstructure

半固态成型技术是一种制造近终成型性的高质量零部件的新技术,与传统制造技术对比优点明显,近几年在国内外受到了广泛重视及关注。触变成形技术由制备非枝晶浆料、二次再重熔以及半固态成形三个重要步骤构成。其中制备非枝晶浆料是决定半固态成形组织优劣的关键。半固态等温热处理法是把金属直接加热到固液两相区进而获得半固态浆料,工艺流程较短,细化处理后的合金能获得更加细小圆整的近球形组织,减去了机械或电磁搅拌法等制备非枝晶织织的步骤,因此受到业界关注[1-3]。

虽然近几年国内外也对非枝晶浆料制备有一定的研究,但是其研究成果主要聚集在 ZA27 和 AZ91D 等几种合金上,对其他合金研究不多。因此,本文研究了经 $MgCO_3$ 细化的不同晶粒尺寸 AM60B 合金半固态等温热处理过程中的微观组织演变,以期为 AM60B 合金半固态浆料制备以及半固态成型技术的发展奠定基础。

1　实验材料和方法

实验选用 AM60B 合金铸锭,其化学成分如表 1 所示。半固态实验用 $MgCO_3$ 细化处理的 AM60B 镁合金试棒作为实验材料[4],其细化工艺是 AM60B 镁合金熔炼过程添加 1.2%$MgCO_3$ 细化处理;树枝晶选用 730 ℃加入的 1.2%$MgCO_3$ 的实验工艺,细小等轴晶镁合金选用 790 ℃添加的 1.2%$MgCO_3$ 实验工艺[5]。实验在 SRJ×45 电阻炉上进行。实验过程中控温热电偶与试样表面保持接触,严格控制测温精度。试样放入炉膛立刻开始计时,到达预定时间后,立即取出试样并水淬。腐蚀剂为 3%HNO_3 水溶液,利用扫描电镜进行微观组织变化分析。

2　实验结果与分析

图 1 为 AM60B 镁合金的铸态微观组织,合金的显微组织由基体 Mg 和呈不连续网状沿晶界分布的共晶组织 $Mg_{17}Al_{12}$ 组成,如图 1(a)所示。其中的 $Mg_{17}Al_{12}$ 相呈网状,并在 Mg 基体中相间分布,如图

收稿日期:2016-06-03

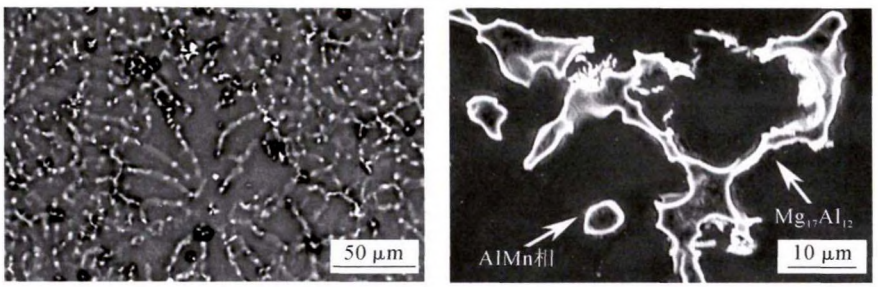
基金项目:浙江机电集团公司科技项目(2017JD004);浙江省教育厅课题(Y201738262),浙江机电职业技术学院科教融合项目(A-0271-18-201)

作者简介:王瑞权(1983-),河南南阳人,硕士,副教授.研究方向:金属材料成型.电话:15058158128,
E-mail: wrq7@163.com

表1 AM60B合金的成分 w(%)

Tab.1 Chemical constitution of AM60B magnesium alloy

Al	Zn	Mn	Si	Cu	Ni	Fe	Be	Mg
5.8~6.2	≤0.18	0.30~0.40	≤0.04	≤0.005	≤0.001	≤0.003	0.000 8~0.001 5	其余



(a)晶粒形貌　　(b)相形貌

图 1 AM60B 的铸态显微组织

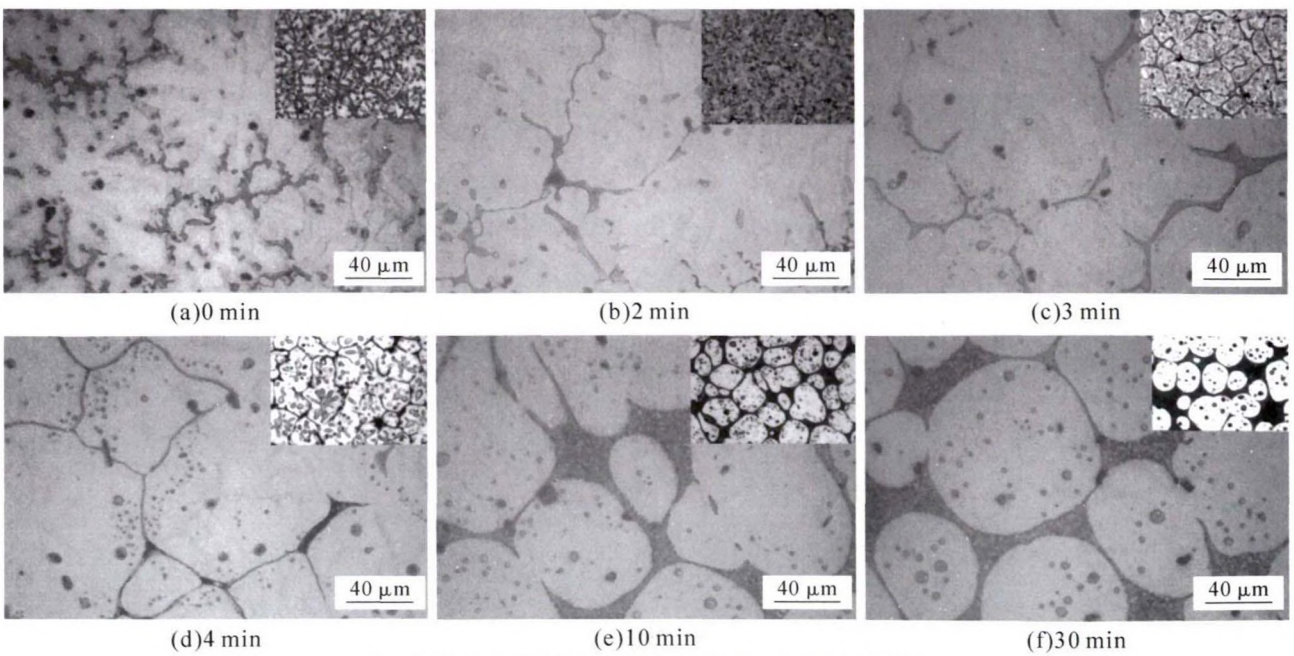
Fig.1 As-cast microstructure of AM60B

1(b)所示。另外，在镁晶粒内存在弥散分布的 AlMn 相颗粒。

图 2 为 AM60B 镁合金 730 ℃加入 1.2%$MgCO_3$ 形成的发达树枝晶在 610 ℃半固态等温热处理过程中的组织演变。前期研究已得出该实验合金最佳的等温热处理温度为 610 ℃[6]，从金属熔化的基本过程看，熔化首先发生在最后凝固部位，这和金属凝固过程刚好相反。一般来说枝晶根部溶质浓度比其他地方要高，导致枝晶根部熔点较低。对于较大晶粒来说，较发达的枝晶根部，更容易在较低温度下熔化，在界面能的促进作用下，形成单独的颗粒。这是由于在半固态过程中溶质从曲率大(即枝晶根部处曲率大，溶质浓度高)的位置向曲率小(平界面处曲率小，浓度低)处扩散，使之前位置局部溶质浓度平衡被打破；为了保持溶质的浓度平衡，曲率较大的地方首先发生熔断，使得曲率变小，溶质溶度下降，从而形成新的球状组织。如图 2 所示，在半固态等温热处理 4 min 至 10 min 的时候，枝晶断裂比较明显[7]。

由图 2 可见，在镁合金晶粒较大的时候，在半固态等温热处理时其微观组织经过晶粒初始粗化、枝晶组织分离、组织球化以及晶粒粗化四个变化过程。一个原始树枝晶往往演变成多个球状颗粒，如图 3。

图 4 所示为 AM60B 镁合金 790 ℃添加 1.2% $MgCO_3$ 形成的细小等轴晶组织在 610 ℃半固态等温热处理过程中的组织演变。从图 4 中能够看出，在等温热处理过程中，保温 3 min(图 4c)时，Al 原子已开始发生扩散固溶，初始的等轴晶形貌已经消失，在等轴晶组织中的晶界和晶内都已经出现重熔液相。等温热处理过程中晶间液相的形成对晶粒组织演变



(a)0 min　(b)2 min　(c)3 min

(d)4 min　(e)10 min　(f)30 min

图 2 树枝晶经半固态等温热处理不同时间后的组织演变

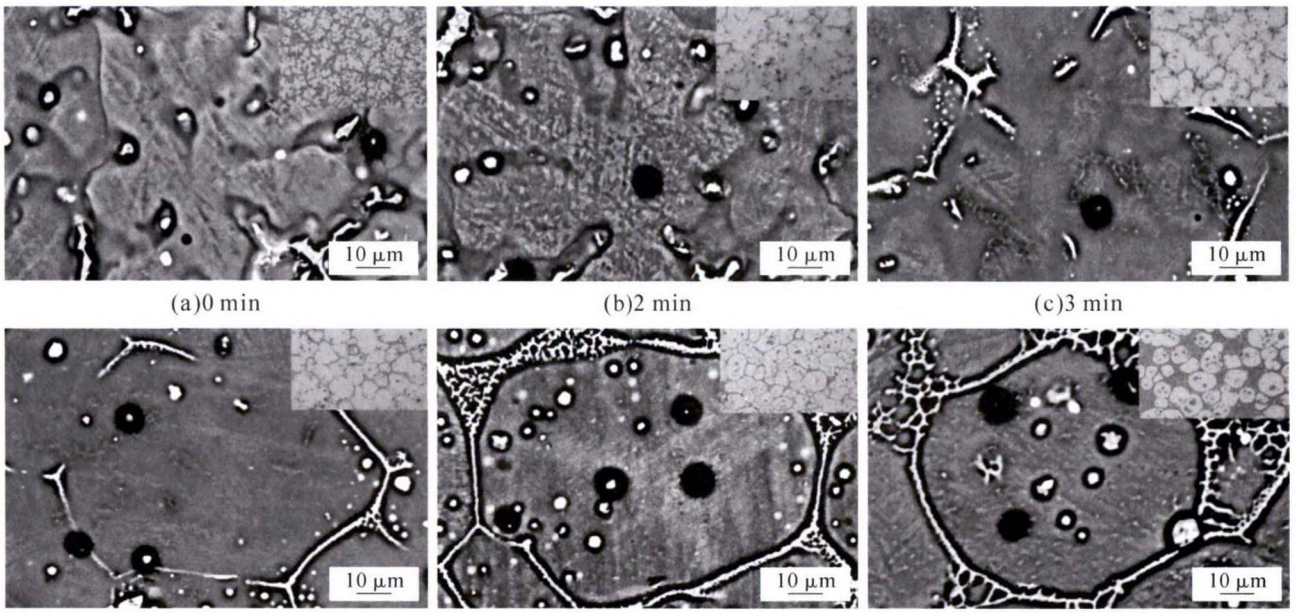
Fig.2 Microstructure evolution of dendrites after semi-solid isothermal heat treatment



(a)树枝晶　(b)初始粗化　(c)枝晶分离　(d)球化　(e)最终粗化

图 3 树枝晶在半固态等温热处理过程中的组织演变示意图

Fig.3 Schematic diagram of microstructure evolution diagram of dendrite during semi-solid isothermal heat treatment



(a)0 min　(b)2 min　(c)3 min

(d)4 min　(e)10 min　(f)30 min

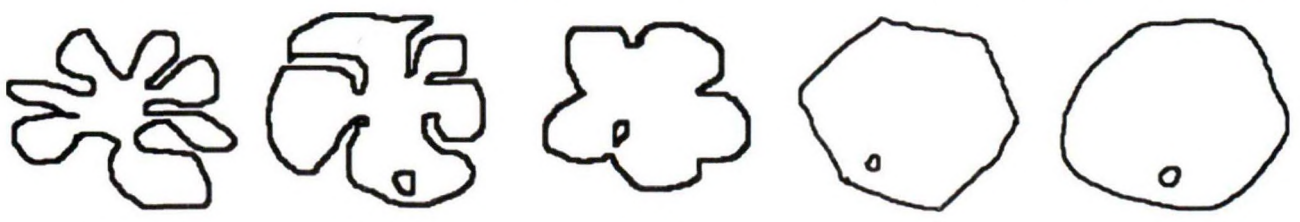
图 4 细小等轴晶在 610 ℃不同保温时间下的微观组织

Fig.4 Microstructure of fine equiaxed crystals at 610 ℃ for different holding time

起着至关重要的作用。晶间液相一般都是先以点出现，在界面张力作用下，发生联通并逐渐形成在固相颗粒外包裹的封闭液相膜。在液固相界面曲率及表面能相互制约作用下，晶粒逐渐向表面能最低、面积最小的球形转化，然后再经过一段时间变得更加圆整，见图 4(d)~ 图 4(f)。

但由于镁合金经过细化，原始晶粒较小，等轴枝晶根部的 Al 元素分布比较均匀，没有明显的溶质富集，快速粗化过程中也没发生枝晶熔断，即一颗原始等轴枝晶最终仅形成一个初生 α 颗粒，且半固态球化颗粒直径与原始枝晶等效直径相比基本相当，如图 5。而对于比较发达的树枝晶(晶粒的直径通常较大)，在等温热处理过程中在枝晶根部容易发生溶质元素富集，二次枝晶臂较容易在根部熔断，进而变成另一个新的细小初生颗粒，如图 3。

在一定的等温热处理温度下，球状晶的形成、液相率达到合适值还需要一定的时间。如果时间过短，理想的液相率则达不到，球状晶也不规则，不利于半固态成形；另外，不同基体组织、组织的形状与大小不同，合金材料的球状、液相率等也不同[8]。因此，还



(a)等轴晶　(b)枝晶合并　(c)溶质扩散　(d)块状化　(e)球化

图 5 细小等轴晶在半固态等温热处理过程中的演变示意图

Fig.5 Evolution schematic diagram of fine equiaxed grains during semi-solid isothermal heat treatment

(下转第 1070 页)

粒度减小，生成了更多的 TiC 和 TiB_2 颗粒，有利于提高复合层的硬度。当距离复合层外表面 3~5 mm 时，复合层硬度值分布较为平缓，但仍明显高于普通 45 钢的维氏硬度（一般在 241~266 HV 之间[6]）。这是由于在高温钢液浇注过程中，部分合金粉末原料扩散到了基体附近，并在基体附近原位生成了增强颗粒。

3 结论

B_4C 粉末粒度对复合材料复合层和过渡层的的组织均有显著影响。随着 B_4C 粉末粒度减小，复合层和过渡层中 TiC 和 TiB_2 增强颗粒数量呈现上升趋势，同时尺寸减小；硬度测试显示，随着 B_4C 粉末粒度减小，复合层和过渡层的硬度显著提高。

参考文献：

[1] 韩文华，宋博宇，刘桂荣. Ti-Fe 粉的加入量对 TiB_2 颗粒增强 45 钢基表面复合材料组织和硬度的影响[J]. 包头职业技术学院学报，2017，18(2)：11-15.

[2] 张冉阳，陈跃. 消失模铸渗技术的研究进展 [J]. 铸造技术，2005，26(6)：544-547.

[3] 刘岗，严岩，王峰，等. 电子陶瓷用钛酸钡粉体制备方法研究进展[J]. 绝缘材料，2006(1)，56-63.

[4] 蔡利芳，张永忠. 原位合成法在材料制备中的应用及进展[J]. 金属热处理，2005，30(10)：1-6.

[5] 杨家豪，潘成刚，蔡文菁，等. 高频感应辅助 SHS 制备 TiC 基平面复合涂层工艺研究[J]. 铸造技术，2018，39(9)：1948-1954.

[6] 魏德强，任旭隆，王 荣，等. 45 钢电子束扫描表面 W 合金化组织和硬度[J]. 焊接学报，2019，40(2)：98-103.

（上接第 1066 页）

需要进一步探索保温时间、基体晶粒尺寸与液相率、形状系数、球化晶粒大小等之间的定量关系。

3 结论

(1)AM60B 镁合金经 $MgCO_3$ 细化处理，在一定的等温热处理工艺后可以获得细小圆整的半固态组织。

(2)原始晶粒粗大时，在半固态等温热处理时经过晶粒初始粗化、枝晶组织分离等过程，一个原始晶粒一般形成多个球状 α 颗粒；原始晶粒较小时，等轴枝晶根部不容易发生明显的溶质富集和枝晶熔断，一颗原始枝晶一般最终仅形成一个初生 α 颗粒。

(3)在一定的等温温度下，球状晶形成、液相率达到合适值需要一定的时间。

参考文献：

[1] 吉泽升，吕新宇，王国军，等. 镁合金半固态成形技术的研究进展[J]. 金属热处理. 2003(5): 8-11.

[2] 康永林，毛卫民，胡壮麒. 金属半固态加工理论与技术[M]. 北京：科学出版社，2004.

[3] 王瑞权，邱葭菲，姚荣庆，等. 保温时间对镁合金压铸组织及性能的影响[J]. 铸造技术，2013，34(5): 535- 537.

[4] 王瑞权，邱葭菲，林波，等. $MgCO_3$ 对镁合金细化机理的研究[J]. 热加工工艺，2011，40(19): 26- 27.

[5] 王瑞权. $MgCO_3$ 对 AM60B 镁合金晶粒细化工艺的研究 [J]. 铝镁通讯，2009，(4): 28- 30.

[6] Chen Ti-jun, Ma Ying, Wang Rui-quan. Microstructural evolution during partial remelting of AM60B magnesium alloy refined by $MgCO_3$ [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(9): 1615- 1621.

[7] 李元东，郝远，阎峰云，等. AZ91D 镁合金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)：571-575.

[8] 王瑞权，邱葭菲，陈云祥，等. 细晶镁合金在半固态等温热处理过程中的组织研究[J]. 机电工程，2014(12): 29-31.

《铸件均衡凝固技术及应用实例》

《铸件均衡凝固技术及应用实例》由西安理工大学魏兵教授编著。共 8 章：1、铸铁件均衡凝固与有限补缩；2、铸铁件冒口补缩设计及应用；3、压边浇冒口系统；4、浇注系统大孔出流理论与设计；5、铸件均衡凝固工艺；6、铸钢、白口铸铁、铝、铜合金铸件的均衡凝固工艺；7、浇注系统当冒口补缩设计方法；8、铸件填充与补缩工艺定量设计实例。全书 320 页，特快专递邮购价 226 元。

邮购咨询：李巧凤 029-83222071，技术咨询：13609155628