

# 电磁组合场对镁合金凝固组织的影响

许光明, 李金涛, 崔建忠

(东北大学 材料电磁过程研究教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110004)

**摘要:** 研究了不同电磁组合场对 AZ61 镁合金凝固组织的影响。结果表明, 在静磁场作用下, 镁合金的凝固组织为等轴晶, 晶界上的结晶相成网状分布; 在静磁场与工频交流电组合场作用下, 其凝固组织与只施加静磁场时类似, 基本为等轴晶, 但由于交流电的施加晶粒明显得到细化, 晶界上结晶相的网状结构也变得细小; 而在镁合金凝固过程中同时施加静磁场和直流电流组合场时, 由于组合场产生的熔体内部的定向力作用的结果, 凝固组织主要为蔷薇状晶粒, 组织得到明显的净化, 其晶界上结晶相的网状结构彻底消失, 以不连续的薄条状和点状形态分布。

**关键词:** AZ61 镁合金; 电磁组合场; 结晶相

中图分类号: TG146.2<sup>+</sup>2

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2009)12-2195-04

镁合金具有优异的性能(密度低、比刚度和比强度高)。镁的标准电位为 $-2.363\text{ V}$ , 是负电性很强的金属, 耐蚀性较差。镁合金在材料制造、加工成型和产品使用过程中都存在被氧化的问题, 因而它的应用受到很大的限制, 其优越性得不到发挥。20 世纪 90 年代以后, 随着冶炼技术的提高和先进成型技术的出现以及制造成本的降低, 镁合金才得到实际应用, 目前不仅在航空航天, 而且在汽车工业、电子信息、民用家电等领域均已得到广泛的应用。镁合金由于其独特的性能, 被誉为“21 世纪绿色工程材料”<sup>[1-4]</sup>。

电流对金属材料影响的研究可以追溯到 19 世纪, 1861 年, M. Geradin 在铅-锡、汞-钠熔融合金中观察到原子在电流作用下出现的运动现象。而在此后的一个世纪后, 科学家发现电流对金属材料变形行为也有显著影响。随着电塑性效应的发现, 科学家们在实验与理论上对电塑性效应和电流对金属材料的组织结构与性能的影响进行了大量的较系统的研究。发现电流不仅对金属材料的塑性变形行为有显著影响, 而且对金属材料的组织结构转变和性能有显著影响, 但迄今仍有很多理论问题没有解决<sup>[5-7]</sup>。磁场对镁合金凝固组织的晶粒细化作用已经有人做过相关研究<sup>[8-11]</sup>。本实验在此基础上进一步研究了在不同电流和磁场组合条件下 AZ61 镁合金的组织变化, 研究其晶界上化合物的形状及分布规律, 为镁合金的进一步研究打下基础。

## 1 实验

收到初稿日期: 2008-11-23; 收到修改稿日期: 2009-09-09

基金项目: 国家“973”项目(2007CB613706)

作者简介: 许光明, 男, 1966 年生, 博士, 教授, 东北大学材料电磁过程研究教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110004, 电话: 024-83681758, E-mail: xu\_gm@epm.neu.edu.cn

实验设备示意图如图 1 所示。感应线圈内径为 50 mm, 线圈为 8 层, 外径为 150 mm, 线圈中通以 200 A 的直流电。线圈内部安置一个瓷管, 中间塞入石棉并缠绕电阻丝以使镁合金熔体保温, 在陶瓷管中间放置陶瓷坩埚。

实验时, 把 AZ61 镁合金试样放入坩埚中, 利用电阻丝对其加热, 达到所需要的温度, 然后停止加热,

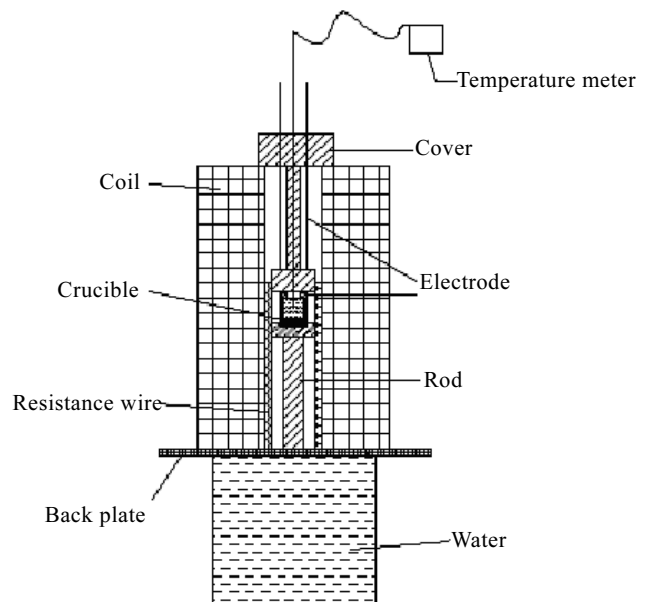


图 1 实验设备示意图

Fig.1 Scheme of experiment apparatus

并给感应线圈加载电流，同时在镁合金的熔体中加载电流。为了研究外场对镁合金组织的影响，进行了静磁场与直流电组合、静磁场与交流电组合及静磁场单独作用 3 种条件下的合金凝固，实验中熔体温度与保温过程均相同。

对放置镁合金位置的磁场强度进行测量，测得值为 0.3 T。静磁场电流组合场共同作用时，无论是直流电还是交流电，电流大小均为 10 A。实验时镁合金在加热到 640 °C 后保温 10 min，然后停止加热，同时施加磁场和电流，待冷却至预定温度后淬火，保留下此时的组织形态。最后截取试样的中间界面进行组织观察。

实验中采用的材料为 AZ61 镁合金，化学成分如下（质量分数）：5.7%Al, 0.9%Zn, Fe、Si<0.01%，余量为 Mg。

采用光学显微镜分析比较镁合金在不同外场作用下凝固组织的变化情况，并分析晶界上组织的数量和形状变化。

## 2 结果及分析

不同电磁组合场对镁合金组织的影响如图 2 所示。图 2a 为不施加任何外场下凝固得到的组织。从图中可以看出，由于凝固过程不受任何外力，合金元素的偏聚不受约束，晶界处形成较为宽厚的结晶相。图 2b 为静磁场作用下镁合金的凝固组织。由于静磁场的作用，更多的合金元素被固溶到基体内，因此，晶界处的结晶相明显减少。图 2c 为静磁场和交流电组合场

作用下凝固的镁合金组织。从图中可以观察到晶粒多为等轴晶，晶粒的等轴化效果非常明显，但组织没有明显的净化效果，夹杂较粗大。图 2d 为静磁场和直流电组合场作用下凝固的镁合金组织。由于组合场引起的熔体内部的定向力作用，组织得到明显净化，组织主要为蔷薇状晶粒。

图 3 为不同电磁组合场作用下镁合金的晶界形貌。图 3a 为不施加任何外场条件下的 AZ61 镁合金晶界形貌。晶界上结晶相呈网状结构。当凝固过程中施加静磁场时，镁合金晶界的形貌如图 3b 所示。从图中可以看到，与不施加外场情况类似，晶界边缘平滑，晶界上的结晶相也呈连续的网状结构，但网状变得较为细小。图 3c 为静磁场与交流电组合场共同作用时镁合金的凝固组织。与单一静磁场作用下的镁合金的凝固组织相似，晶界上结晶相的数量明显减少，但连续的网格已被打断，更多的是以点状形式分布于镁基体上，晶界的边缘也由于电磁组合场的作用而变得凹凸不平，这种结构有利于提高镁合金的塑性。而在镁合金凝固过程中同时施加静磁场和直流电的组合场时，镁合金组织中晶界上结晶相的网状被彻底打碎，取而代之的是不连续的条状和点状，结晶相的数量进一步减少，如图 3d 所示。同时，晶界边缘更加变得参差不齐，这种晶界对提高镁合金的塑性是最为有利的。

在静磁场的作用下，镁合金熔体的溶质粒子按螺旋轨道运动，而原来无序的自由运动受到抑制，所以随着凝固过程的进行和固液界面的推进，从固相向液

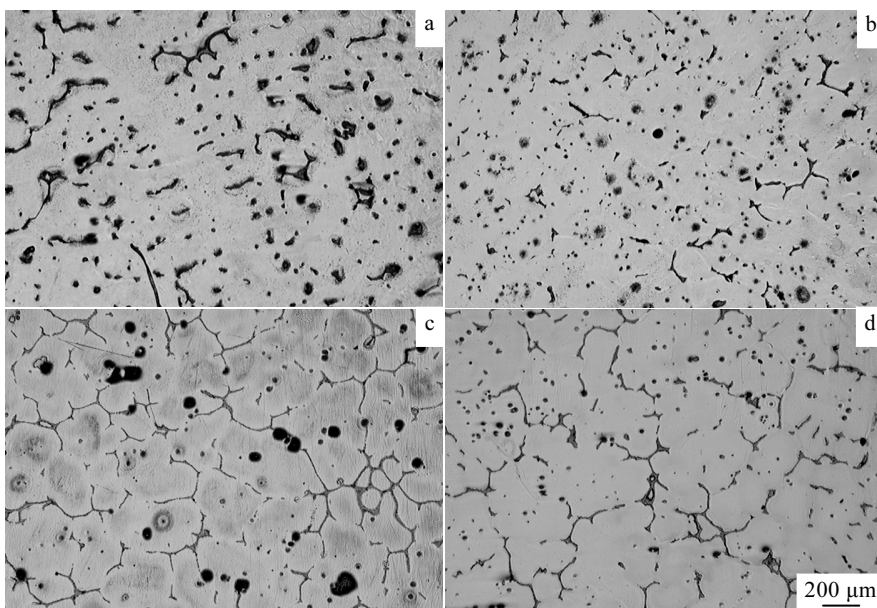


图 2 不同外场作用下 AZ61 镁合金的组织

Fig.2 Microstructures of AZ61 magnesium alloy solidified in different electric and magnetic fields: (a) common, (b) magnetostatic field, (c) magnetostatic and AC current, and (d) magnetostatic and DC current

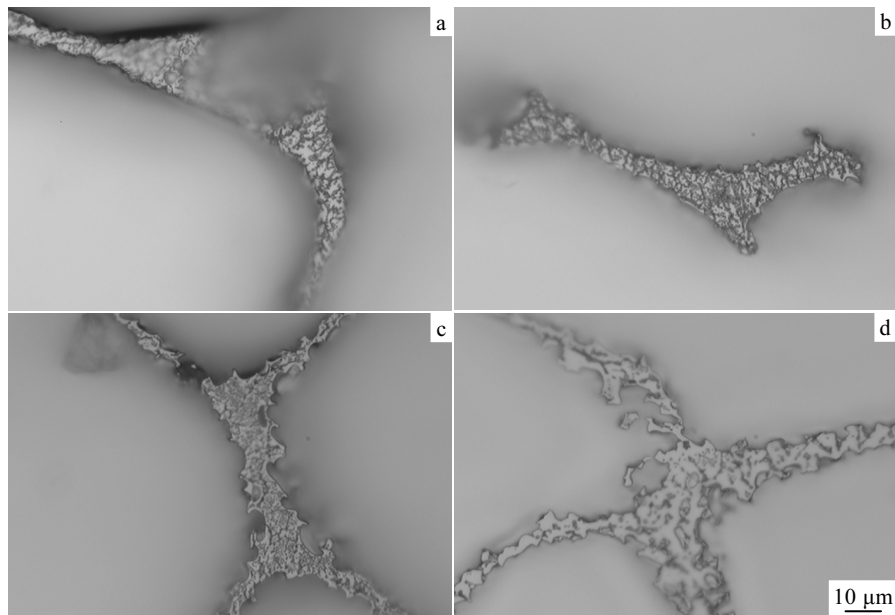


图 3 不同外场作用下 AZ61 镁合金晶界形貌

Fig.3 Grain boundary morphologies of AZ61 magnesium alloy solidified in different electric and magnetic fields: (a) common, (b) magnetostatic field, (c) magnetostatic and AC current, and (d) magnetostatic and DC current

相排出的溶质量减少<sup>[12]</sup>, 造成静磁场作用时晶粒形态主要为等轴晶<sup>[13]</sup>, 合金元素在基体中的固溶增加, 析出相减少。

在静磁场与交流电组合外场的作用下, 由于交流电大小和方向的周期性变化, 带电粒子受到电场力的大小和方向也呈周期性变化<sup>[14]</sup>, 其结果是增加了溶质粒子在原有位置的振幅, 粒子的运动轨迹仍然是螺旋轨道, 但轨道半径增加了。因此同静磁场单独作用时相似, 磁场和交流电共同作用时晶粒形态主要为等轴晶, 同时交变电磁力的作用改变了原来晶界的形状, 产生了锯齿状的晶界外貌。

与交流电不同, 在静磁场与直流电的组合外场作用下, 一方面, 由于静磁场的作用, 熔体中的带电粒子受洛伦兹力的作用要做螺旋轨道运动<sup>[13]</sup>; 另一方面, 由于引入直流电后, 在熔体两端造成一个电势差  $\Delta U$ <sup>[14]</sup>, 因而熔体中的带电粒子会受到一个大小和方向恒定的电场力  $F$  的作用。由于  $F$  的作用, 原来做螺旋轨道运动的带电粒子会离开原来的轨道做曲线运动, 最终的运动方向趋向于与  $F$  的方向一致, 这种恒定的电磁力起到了净化镁合金熔体的作用。所以在静磁场和直流电共同作用时的镁合金组织多为蔷薇状, 组织明显净化。

### 3 结 论

1) 在静磁场与交流电组合外场的共同作用下, 与

静磁场相似, 组织以等轴晶为主; 而在静磁场与直流电组合外场的共同作用下为蔷薇状。

2) 静磁场单独作用时, 晶界上的化合物以连续的网格分布, 在引入交流电后, 连续的网格被打断, 更多的是以点状形式分布; 而在静磁场与直流电组合外场的共同作用下, 晶界上的网格彻底消失, 化合物以点状形式分布于镁基体上。

### 参考文献 References

- [1] Xu Guangming(许光明) *et al. Chinese Journal of Rare Metals* (稀有金属)[J], 2004, 28(1): 89
- [2] Zhai Chunquan(翟春泉) *et al. Materials for Mechanical Engineering*(机械工程材料)[J], 2001, 25(1): 6
- [3] Liu Zheng(刘 正) *et al. Theory Foundation and Application of Magnesium Alloy*(镁基轻质合金理论基础及其应用)[M]. Beijing: Mechanical Industrial Press, 2002
- [4] Zeng Rongchang(曾荣昌) *et al. Acta Metallurgica Sinica*(金属学报)[J], 2001, 37(7): 674
- [5] Hans Conrad. *Materials Science and Engineering*[J], 2000, A287: 205
- [6] Zhang Beijiangu *et al. J Mater Sci Technology*[J], 2002, 18(5): 401
- [7] Yao Kefu(姚可夫) *et al. Journal of Mechanical Strength*(机械强度)[J], 2003, 25(3): 340
- [8] Zhao Hongyan(赵红岩) *et al. Light Alloy Fabrication Techno-*

- logy(轻合金加工技术)[J], 2006, 34(8): 14
- [9] Bao Weiping(包卫平) *et al.* *Journal of Material and Metallurgy*(材料与冶金学报)[J], 2003, 2(3): 216.
- [10] Han Fuyin(韩富银) *et al.* *Research Studies on Foundry Equipment*(铸造设备研究)[J], 2005, 3: 13
- [11] Ma Xiaodong(马晓东) *et al.* *Foundry*(铸造)[J], 2007, 56(9): 914
- [12] Hu Hanqi(胡汉起). *Metal Solidifying Theory*(金属凝固原理)[M]. Beijing: Mechanical Industrial Press, 2000
- [13] Bao Weiping(包卫平) *et al.* *Acta Physica Sinica*(物理学报)[J], 2004, 53(6): 2024
- [14] Zhao Kaihua(赵凯华) *et al.* *Electromagnetics*(电磁学)[M]. Beijing: High Education Press, 1985

## Effect of Electric-Magnetic Field on Solidification Microstructure of Magnesium Alloys

Xu Guangming, Li Jintao, Cui Jianzhong

(Key Laboratory of National Education Ministry for Electromagnetic Processing of Materials,  
Northeastern University, Shenyang 110004, China)

**Abstract:** Solidification microstructure of AZ61 magnesium alloys with different electric-magnetic fields was studied. It was found that solidification microstructure of magnesium alloys were equiaxed grains and the Mg-Al-Zn compound phases appeared as meshes on grains boundaries under magnetostatic field. Solidified under the magnetostatic-power current field, the microstructure was mainly consisted of equiaxed grains similar to that under the magnetostatic field. But the grains were refined obviously and the mesh structure of compound phases became fine due to the applied power current; while in the solidification process of Mg alloys under the magnetostatic-direct current field, the solidification microstructure was mainly rosette grain and purified significantly; the mesh structure of the compound phases disappeared entirely and they were distributed as discontinuous ribbons and spots; they were the results of the directional force inside melts caused by the combination fields.

**Key words:** AZ61 magnesium alloys; electric-magnetostatic field; compound phase

---

Biography: Xu Guangming, Ph. D., Professor, Key Laboratory of National Education Ministry for Electromagnetic Processing of Materials, Northeastern University, Shenyang 110004, P. R. China, Tel: 0086-24-83681758, E-mail: xu\_gm@epm.edu.cn