

电磁场作用下溶质元素在镁合金 AZ61 的分布^{*}

许光明[†] 郑佳伟 刘 勇 崔建忠

(东北大学材料电磁过程研究教育部重点实验室 沈阳 110004)

(2005 年 12 月 9 日收到 2006 年 12 月 5 日收到修改稿)

通过研究不同外场作用下镁合金 AZ61 的凝固组织,发现在静磁场单独作用时的晶界主要由镁基体和连续的网状化合物组成,在静磁场与交流电组合外场下的晶界主要由镁基体和网状及点状 Mg-Al-Zn 化合物组成,而在静磁场与直流电组合外场下晶界上的连续网状化合物彻底消失,化合物以不连续的薄片形态分布于镁基体上.相对于单一静磁场作用时,静磁场与电流共同作用时提高了镁合金晶内溶质含量,降低了晶界上的溶质含量.

关键词:镁合金,静磁场,电流,晶内溶质含量

PACC:8130F

1. 引 言

镁的原子序数为 12,相对原子质量为 24.32,镁在 20℃时的密度只有 1.738 g/cm^3 ^[1],是常用结构材料中最轻的金属,镁的这一特征与其优越的力学性能相结合成为大多数镁基结构材料应用的基础.此外,由于镁合金具有较高的比强度、比刚度,减震性能好,在频率较宽的范围内有较好的电磁屏蔽性能,且有极好的切削加工性能,目前已经在航空航天、汽车制造、电子信息等领域得到广泛的应用^[2,3].但是镁合金的室温塑性很差,因而它的应用受到了很大的限制,其优越性得不到充分发挥.

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也有显著的影响,但迄今仍有很多理论问题没有解决^[4,5].本文研究了镁合金 AZ61 在不同电流和磁场组合条件下的

合金元素在晶内及晶界的分布规律,为镁合金的进一步研究打下基础.

2. 实验方法及材料

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 层组成,线圈外径为 150 mm,线圈通以 200 A 的直流电流.线圈内部安置一个瓷管,中间塞入石棉并缠绕电阻丝以加热镁合金熔体,在陶瓷管中间放置陶瓷坩埚.实验时,把 100 g 左右 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,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,本文进行了静磁场与直流电(M+DC)、静磁场与交流电组合(M+AC)及静磁场(M)单独作用三种条件下的合金凝固研究,实验中熔体温度与保温过程均相同.

实验中采用的材料为 AZ61 镁合金,化学成分如下:5.7%Al,0.9%Zn,Fe,Si<0.01%,余量为 Mg.

对放置镁合金的位置进行磁感应强度测量,测得值大小为 0.3 T.静磁场与电流组合场共同作用时,无论是直流电流还是交流电流,电流强度均为 10 A.实验时镁合金被加热到 640℃后保温 10 min,而后停止加热,同时施加磁场和电流,待冷却至预定

^{*} 国家自然科学基金(批准号:50502001,60576012)资助的课题.

[†] E-mail: xu_gm@epm.neu.edu.cn

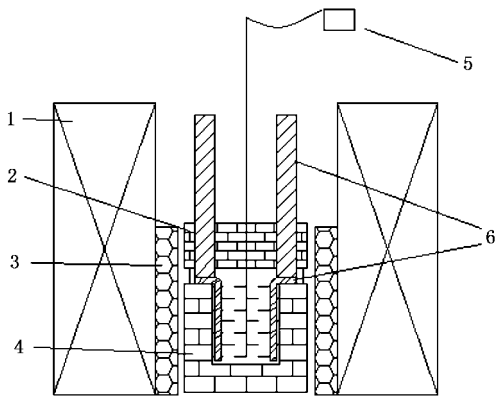


图1 试验设备示意图 (1为感应线圈,2为氧化镁上盖,3为电阻炉,4为坩埚,5为热电偶,6为电极)

温度后淬火,目的是保留此时的组织形态。

在样品中部沿垂直轴线的横断面取样,采用 ELECTRON PROBE MICROANALYZER EPM-810 型电子探针对待样进行点扫描,以确定试样的晶粒内部以及晶界上的溶质含量。

3. 实验结果及分析

不同外场组合对镁合金组织的影响如图2所示。图2(a)为单一静磁场作用时镁合金晶界形貌,从图中可以看到,晶界边缘平滑,晶界主要由镁基体和连续的 Mg-Al-Zn 网状化合物组成^[6,7]。图2(b)为静磁场与交流电组合外场共同作用下镁合金晶界形貌,可以发现,晶界组织与单一静磁场作用下的镁合金的凝固组织相似,晶界较薄,晶界上的 Mg-Al-Zn 三元化合物含量较多,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。静磁场和直流电组合场作用下镁合金晶界形貌如图2(c)所示,与前者相比,静磁场和直流电组合场作用时晶界边缘参差不齐,晶界上的连续网格彻底消失, Mg-Al-Zn 三元化合物以不连续的薄片形态分布于镁基体上。

从上述分析可以看出,镁合金 AZ61 在不同的外场作用下凝固时,晶界上的化合物的形态以及含量是不同的,为此,我们对不同制度下的试样进行电子探针扫描,其中每个试样选取几个位置进行晶内和晶界上的溶质含量的统计分析,分析结果如如图3和图4所示。

图3(a)(b)分别为不同外场作用下在 590℃和 500℃时淬火得到的组织晶粒内部溶质含量的变化

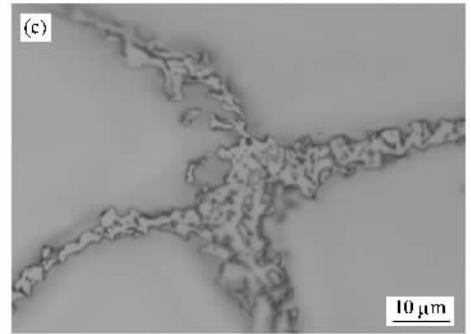
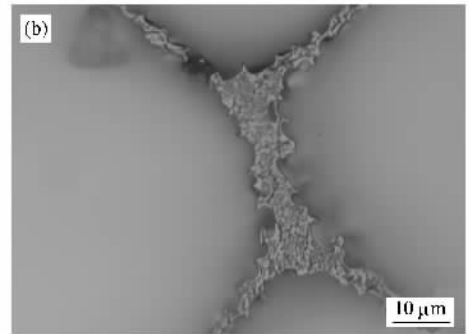
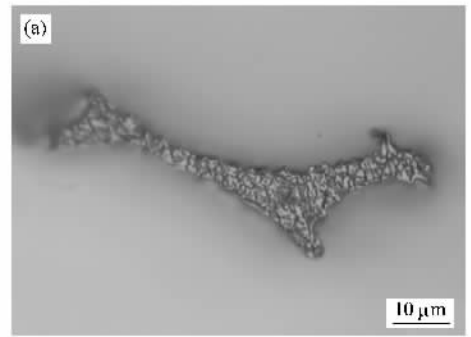


图2 不同外场作用下镁合金 AZ61 晶界形貌 (a)静磁场 (b)静磁场与交流电 (c)静磁场与直流电

曲线。从曲线图中可以观察到,从晶内到晶界,总体上溶质含量是升高的,且静磁场与直流电共同作用下的溶质含量略高于静磁场与交流电共同作用时的溶质含量,而两者晶内的溶质含量均高于只有静磁场单独作用时的含量,这说明磁场和电流共同作用时提高了溶质元素在 α -Mg 基体中的固溶度。

图4(a)(b)分别为 590℃和 500℃时在施加不同组合外场条件下晶界上的溶质含量。总体而言,静磁场与直流电共同作用时晶界上的溶质含量略低于静磁场与交流电共同作用时的含量,而两者晶界上的溶质含量都低于单一静磁场作用时的含量,说明磁场与电流共同作用时减少了溶质元素在晶界上的析出。

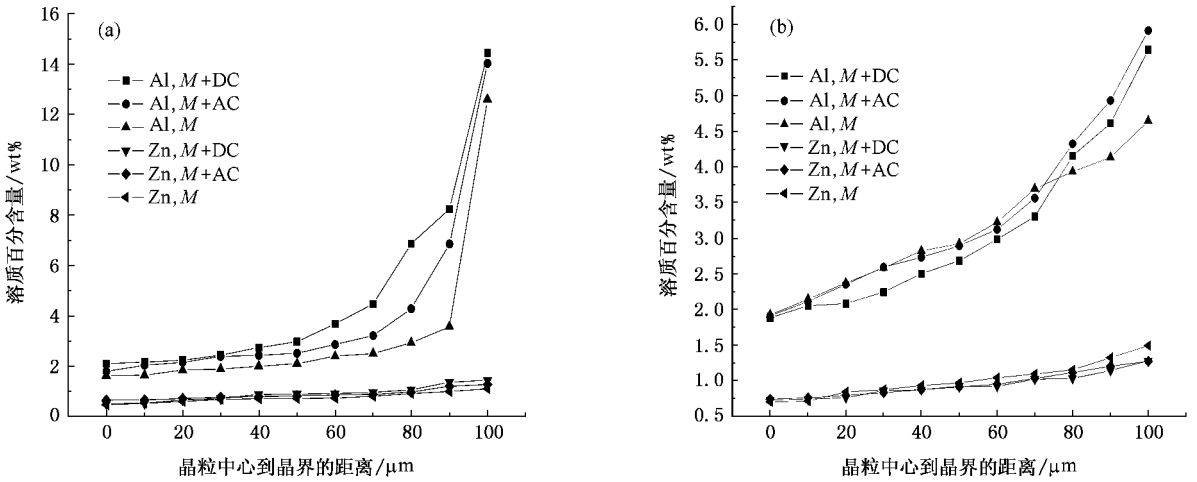


图3 不同外场作用下镁合金 AZ61 晶内溶质含量变化曲线 (a) 90°C下淬火时的变化曲线 (b) 500°C下淬火时的变化曲线

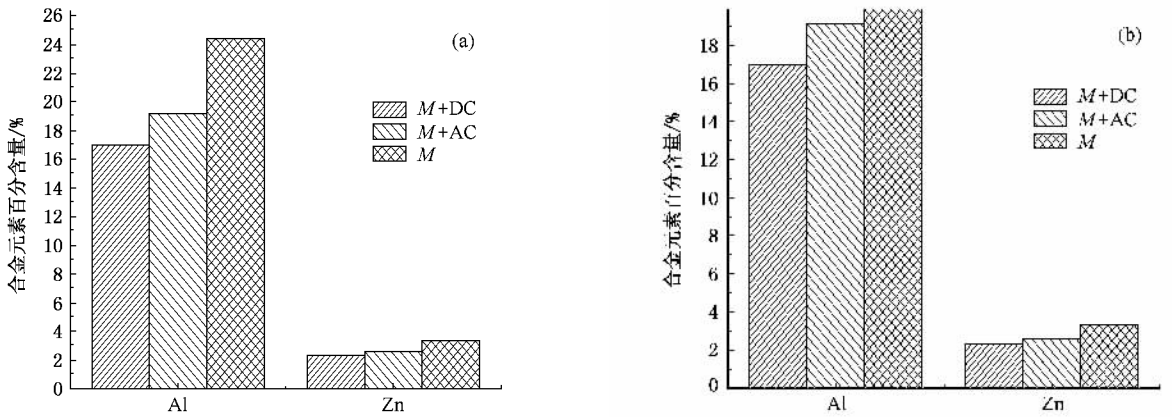


图4 不同外场作用下镁合金 AZ61 晶界上溶质含量变化柱状图 (a) 90°C下淬火时的变化图 (b) 500°C下淬火时的变化图

4. 分析与讨论

这里可将金属熔体看作是由大量粒子(原子、离子、电子等)组成的体系.凝固过程是一个液相原子向固相移动的过程,在这个过程中原子需要克服势垒 ΔG_b ,如图5所示.

观察原子扩散系数的经验表达式为

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q}{kT}\right),$$

式中, D_0 近似看作不随温度变化的常数,称频率因子; Q 称扩散激活能^[8].

当熔体中通入电流后,大量的电子将做定向移动,这也就意味着将有大量的原子失去电子而成为带电离子.金属晶体中的原子始终以其阵点为中心

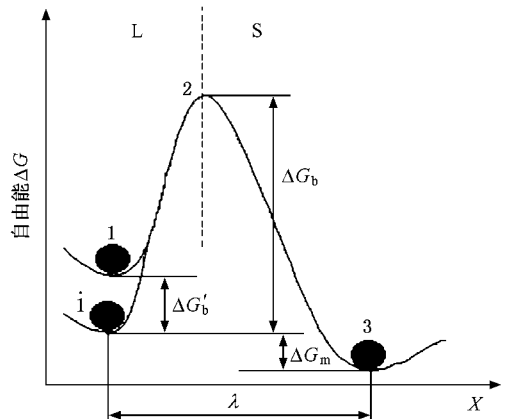


图5 外场对溶质原子扩散势垒的影响

而振动着,当在熔体的凝固过程中同时施加静磁场与直流电时,由电磁场理论可知,线圈通电以后会产

生一个静磁场 B , 此时熔体中的大量原子失去价电子而成为带电离子, 这些带电离子在其阵点中心振动, 因此会产生一个 Lorentz 力作用于离子, 这些离子沿磁力线方向做螺旋运动^[9, 10], 熔体的运动受到抑制; 另一方面, 熔体中通入直流电, 由于电流的作用, 在熔体两端造成一个电势差 ΔU , 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的作用, 限制了带电离子的自由振动, 使得溶质原子的扩散比较困难^[11], 因此整个环境对熔体做负功. 由于增加了电场力的抑制作用, 与单一静磁场作用相比, 静磁场与直流电共同作用增加了溶质原子由液相向固相迁移所需克服的能量势垒, 如图 5 所示, μ_1 位置为单一静磁场作用时粒子的自由能, μ_2 位置为静磁场与直流电共同作用时的自由能. 施加直流电后, 溶质原子迁移所需克服的能量势垒增加了 $\Delta G'_b$. 此外, 静磁场与直流电的共同作用提高了溶质原子在液相中的扩散激活能 Q , 导致 D 也随之减小, 使其在晶内的扩散能力降低, 阻碍了液相溶质原子在凝固过程中向固/液界面迁移, 提高了溶质分配系数, 减少了溶质原子向界面前沿的液相中的排出量. 因此, 相对于单一静磁场作用时, 静磁场与直流电共同作用时增大了溶质原子在镁基体内的溶解度, 降低了晶界上溶质原子的含量.

静磁场与交流电的作用和静磁场与直流电作用的情况类似, 电流的引入同样使得大量原子失去价电子而成为带电离子, 这些带电离子除了要沿磁力

线方向做螺旋运动外, 同样也会受到一个电场力的作用, 由于交流电的周期变化, 作用于带电离子的电场力的大小和方向也呈周期性变化, 这同样抑制了粒子的自由振动, 同直流电一样, 静磁场与交流电共同作用时增加了溶质原子迁移所需克服的能量势垒. 相对于单一静磁场作用时, 静磁场与交流电共同作用时增大了溶质原子在镁基体内的溶解度, 但由于交流电的周期性变化, 原子的振动仍强于直流电作用时的振动, 因此, 静磁场与交流电作用时原子迁移需克服的能量势垒略高于磁场与直流电作用时的势垒, 所以静磁场与交流电作用下的晶内溶质含量略高于静磁场与直流电作用下的晶内溶质含量.

5. 结 论

通过研究镁合金 AZ61 在不同外场组合作用下溶质元素的分布规律, 可以得到以下结论:

1. 静磁场单独作用时, 晶界上的化合物以连续的网状分布, 在引入交流电后, 连续的网状被打断, 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, 晶界上的网状彻底消失, 化合物以点状形式分布于镁基体上.
2. 相比较于单一静磁场的作用, 静磁场与电流共同作用提高了合金的晶内溶质含量, 相应的降低了晶界上的溶质含量.

- [1] Портной К И, Лебедев А А 1952 МАГНИЕВЫЕ СПЛАВЫ (Beijing: Materials Industry Press [in Chinese]) [K. И. 波尔特诺伊, А. А. 列别杰夫 1959 镁合金手册(北京:冶金工业出版社)]
- [2] Michael M A 1999 *ASM International* 259
- [3] Usk B R S 1987 *Magnesium Products Desig* (New York: The International Magnesium Association)
- [4] Hans Conrad 2000 *Materials Science & Engineering A* **287** 227
- [5] Hans Conrad 2000 *Materials Science & Engineering A* **287** 205
- [6] Bao W P, Xu G M, Ban C Y, Cui J Z 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2024 [in Chinese] [包卫平、许光明、班春燕、崔建忠 2004 物理学报 **53** 2024]
- [7] Xu G M, Bao W P, Zheng J W, Zuo Y B, Cui J Z 2004 *Chinese*

Journal of Rare Metals **28** 89 [in Chinese] [许光明、包卫平、郑佳伟、左玉波、崔建忠 2004 稀有金属 **28** 89]

- [8] HU H Q 2000 *Metal solidifying theory* (Beijing: Mechanical Industrial Press [in Chinese]) [胡汉起 2000 金属凝固原理(北京:机械工业出版社)]
- [9] Zhao K H, Chen X M 1985 *Electromagnetism* (Beijing: Higher Education Press [in Chinese]) [赵凯华、陈熙谋 1985 电磁学(北京:高等教育出版社)]
- [10] Han Y, Ban C Y, Ba Q X, Wang S H, Cui J Z 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2955 [in Chinese] [韩逸、班春燕、巴启先、王书晗、崔建忠 2005 物理学报 **54** 2955]
- [11] Lucien N. Brush, Murray B. T 2003 *Journal of Crystal Growth* **250** 170

The distribution of solute elements in AZ61 magnesium alloy under electromagnetic field^{*}

Xu Guang-Ming[†] Zheng Jia-Wei Liu Yong Cui Jian-Zhong

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

(Received 9 December 2005 ; revised manuscript received 5 December 2006)

Abstract

Through studying the microstructure of AZ61 alloy solidified in different external fields , it is found that when solidified in single magnetostatic field , the grain boundaries were composed of matrix Mg and meshy Mg-Al-Zn compounds . When solidified in the field composed of magnetostatic field and alternating current , the grain boundaries were composed of matrix Mg and Mg-Al-Zn compounds which existed as isolated spots as well as a certain amount in the meshy state. But when solidified in the field composed of magnetostatic field and direct current , the mesh disappeared and together with matrix Mg a little Mg-Al-Zn compound appeared as discontinuous flakes. Compared with single magnetostatic field , solidification in magnetostatic field and current makes the solute content in grains to increase and the solute content in grain boundaries to decrease .

Keywords : magnesium alloys , magnetostatic field , current , solute content in grains

PACC : 8130F

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 50502001 , 60576012).

[†] E-mail : xu_gm@epm.neu.edu.cn