

# 脉冲磁场对 Mg-Gd-Y-Zr 合金凝固及力学性能的影响

汪 彬, 杨院生, 周吉学, 童文辉

(中国科学院金属研究所, 辽宁 沈阳 110016)

**摘 要:** 在 Mg-Gd-Y-Zr 合金凝固过程中施加不同频率的脉冲磁场, 研究脉冲磁场对 Mg-Gd-Y-Zr 合金凝固的影响。实验结果表明, 脉冲磁场使 Mg-Gd-Y-Zr 合金晶粒细化, 在频率为 5 Hz 条件下获得最佳的晶粒细化效果, 平均晶粒尺寸从未加脉冲磁场条件下的 65  $\mu\text{m}$  细化到 37  $\mu\text{m}$ 。脉冲磁场的搅拌导致熔体磁过冷及熔体温度梯度降低是晶粒细化的主要原因。脉冲磁场的施加使抗拉强度和延伸率较常规铸造合金分别提高了 4.8%、78.5%。

**关键词:** 脉冲磁场; 凝固组织; 晶粒细化; Mg-Gd-Y-Zr 合金

中图法分类号: TG 146.2<sup>+</sup>2

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2009)03-0519-04

镁合金因其密度小, 比强度高, 吸震、电磁屏蔽性能好等优点, 在航空航天、汽车工业、电子信息、民用家电等领域具有广泛的应用前景。其中 Mg-Gd-Y-Zr 合金作为一种新型高强镁合金, 合金中的 Gd、Y、Zr 元素可以起到固溶强化、沉淀强化、细晶强化的效果, 比 Mg-Gd-Nd-Zr 系镁合金和 WE54 镁合金有更好的室温、高温力学性能以及抗蠕变性能<sup>[1]</sup>。但是, 镁的密排六方结构决定了其强度和塑性变形能力较差, 因而限制了镁合金的进一步应用。为了提高镁合金综合性能, 镁合金的凝固组织控制和晶粒细化已越来越受重视<sup>[2]</sup>。

近年来, 在金属凝固过程中施加电磁场作为一种有效控制材料凝固组织和性能的方法得到快速发展, 其中, 脉冲磁场作为较新的电磁方法受到了广泛关注。崔建忠等<sup>[3,4]</sup>将脉冲磁场应用于 LY12 铝合金的凝固过程, 取得了明显的晶粒细化效果。班春燕等<sup>[5]</sup>在 2124 铝合金凝固过程中施加脉冲磁场, 显著细化了合金晶粒, 并且使 Cu、Mg 的宏观偏析减轻。李秋书等<sup>[6]</sup>在 1Cr18Ni9Ti 奥氏体不锈钢凝固过程中施加脉冲磁场, 细化了奥氏体不锈钢的凝固组织, 且提高了液相线和固相线的温度。高玉来等<sup>[7]</sup>在低熔点的纯铝和高熔点的 1Cr18Ni9Ti 不锈钢凝固过程中施加脉冲磁场, 在整个纯铝试样上获得了完全等轴晶组织, 而在 1Cr18Ni9Ti 不锈钢试样上得到了较细的柱状晶组织。作者在前期研究中将脉冲磁场应用于 AZ91D 镁合金

的凝固过程, 晶粒得到明显细化, 而且使初生  $\alpha\text{-Mg}$  由未加脉冲磁场条件下的枝晶形貌转变为球状形貌<sup>[8]</sup>。本实验选择 Mg-Gd-Y-Zr 合金为研究对象, 在合金凝固的过程中外加脉冲磁场, 研究其对 Mg-Gd-Y-Zr 合金凝固的影响。

## 1 实 验

实验材料选用 Mg-Gd-Y-Zr 合金, 合金的主要化学成分为: Gd 12.07%, Y 3.27%, Zr 0.38%, Fe 0.03%, Mg 余量。

采用自行研制的脉冲磁场凝固装置进行实验, 装置示意图如图 1 所示。脉冲发生器在线圈 L 中产生随

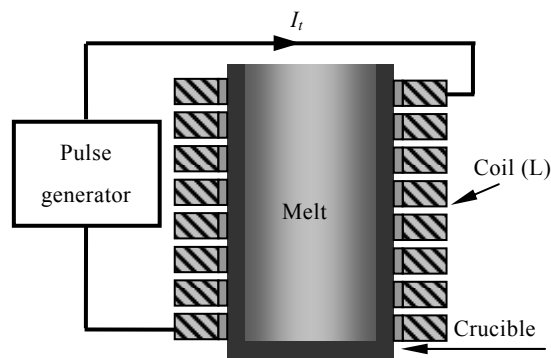


图 1 脉冲磁场装置示意图

Fig.1 Sketch of the experimental apparatus

收稿日期: 2008-02-28

基金项目: 国家自然科学基金项目资助 (50774075)

作者简介: 汪 彬, 男, 1979 年生, 博士生, 中科院金属研究所, 辽宁 沈阳 110016, 电话: 024-23971867, E-mail: binwang@imr.ac.cn;

通讯作者: 杨院生, 电话: 024-23971728, E-mail: ysyang@imr.ac.cn

时间变化的脉冲电流  $I_t$ ，脉冲电流在线圈内部激发脉冲磁场，从而使放置于坩埚中的熔体在脉冲磁场的作用下凝固。

实验时，先将实验用镁合金在电阻炉中熔化至 750 °C 并保温 15 min，然后浇注到置于脉冲磁场凝固装置中预热温度为 580 °C 的石墨坩埚内，浇注完毕后立即启动脉冲磁场发生装置，使镁合金熔体在脉冲磁场作用下凝固。实验时脉冲磁场强度固定，频率分别为 2.5, 5, 10 Hz。另外，为了对比分析，在未加脉冲磁场条件下制备了相同凝固条件下的铸锭。铸锭尺寸均为  $\phi 48 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ 。为测定熔体凝固过程的冷却曲线，将热电偶端部置于熔体的心部，得到外加和未施加脉冲磁场条件下的冷却曲线。

在凝固铸锭 1/2 高度的横截面中心部位制备金相

试样，利用光学显微镜观察凝固组织，采用截线法统计平均晶粒尺寸。沿直径方向将铸锭沿纵截面截开，观察凝固铸锭的顶部宏观形貌。选择最细晶粒对应的脉冲频率条件下的试样，和未加脉冲磁场条件的试样进行拉伸力学性能对比，拉伸试样取自沿铸锭纵向距轴心 1/2 半径处，通过 AG-100KNG 万能试验机进行拉伸试验，得到铸锭的抗拉强度和延伸率，其中力学性能值为同一实验条件下 3 个试样的平均值。对断口进行扫描电镜分析，观察其形貌并判断断裂机制。

## 2 结果与讨论

### 2.1 铸态显微及宏观组织

在不同脉冲磁场频率作用下得到的 Mg-Gd-Y-Zr 合金凝固组织如图 2 所示。其中，图 2a 为无脉冲磁场

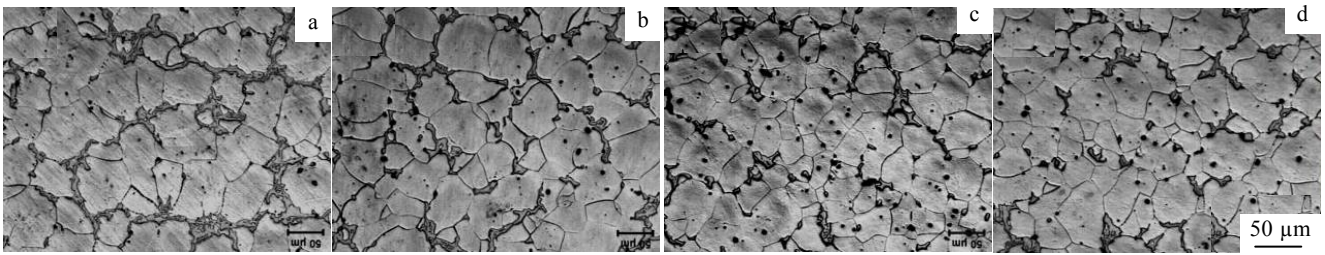


图 2 不同脉冲磁场频率作用下 Mg-Gd-Y-Zr 铸态合金组织

Fig.2 Microstructures of the Mg-Gd-Y-Zr alloy cast in different pulsed magnetic fields: (a) 0 Hz, (b) 2.5 Hz, (c) 5 Hz, and (d) 10 Hz

作用时的凝固组织。从图可看出，铸态组织中第二相基本沿晶界分布，第二相的主要成分是 Mg-Gd-Y 三元相，一般认为该相为  $\text{Mg}_{24}(\text{Gd}_x\text{Y}_y)_5$ ，基体晶粒中则含球状的 Zr 核心<sup>[9]</sup>。在未加脉冲磁场条件下，第二相在晶界连接成网状，图 2b~2d 为外加脉冲磁场条件下的凝固组织，脉冲磁场作用下 Mg-Gd-Y-Zr 合金晶粒得到细化，另外，晶界析出的第二相数量有一定的减少，并且形态从连续的网状演变成为孤立的不规则形状。

图 3 所示为脉冲磁场频率对 Mg-Gd-Y-Zr 合金铸态晶粒尺寸的影响。统计结果显示未加脉冲磁场时铸态平均晶粒尺寸为 65  $\mu\text{m}$ ，在 2.5, 5, 10 Hz 脉冲磁场条件下凝固的铸态平均晶粒尺寸分别为 53, 37, 44  $\mu\text{m}$ 。可见，施加脉冲磁场后，铸态晶粒减小，当 5 Hz 时晶粒最细。

脉冲磁场施加于熔体，会在熔体内部感应产生涡电流，而脉冲磁场和涡电流的交互作用产生电磁力，作用于熔体上产生强烈的搅拌效果。脉冲磁场使金属熔体沿径向收缩，产生熔体的箍缩效应，由于坩埚底部对合金熔体的反作用，使向底部运动的合金熔体折回而向上运动，而熔体的顶部由于没有阻碍，合金熔

体克服重力沿轴向产生跳动。不同频率下 Mg-Gd-Y-Zr 合金铸锭顶部纵截面形貌如图 4 所示。从图中可看出，未施加脉冲磁场条件下，凝固后的 Mg-Gd-Y-Zr 合金铸锭顶部中心存在较大缩孔，这是由于结晶收缩和固态收缩共同造成的。相反，在脉冲磁场作用条件下，由于电磁力的作用，强制熔体流动，使得铸锭的顶部不会形成类似未加脉冲磁场条件下

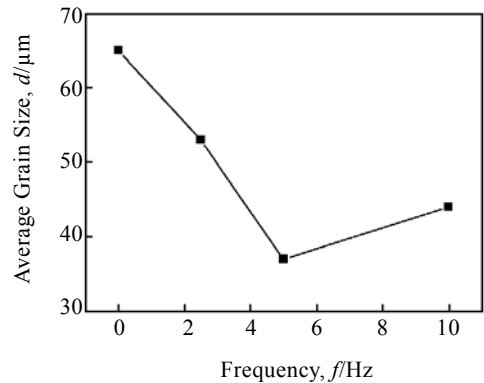


图 3 脉冲磁场频率对 Mg-Gd-Y-Zr 合金晶粒尺寸的影响

Fig.3 Effect of pulse frequency on the average grain size

的顶部缩孔，而补缩主要在铸锭顶部的边部。在 2.5 Hz 较低频率作用下，Mg-Gd-Y-Zr 合金凝固的顶部截面轮廓为近直线，而 5 Hz 条件下顶部会有较大的凸起，形成一个弯月面。继续增大频率到 10 Hz，铸锭顶部的轮廓线为：靠坩埚两侧近直线型，中心部位下凹，存在较小的顶部缩孔。

在外加和未加脉冲磁场条件下，用金相显微镜观察凝固试样的纵截面，均未发现有疏松、内部缩孔等凝固缺陷的存在。这主要是因为 Mg-Gd-Y-Zr 合金的晶粒很细小，而且流动性能很好。另外，由于坩埚预热，合金有足够的凝固时间，也使得凝固试样不易形成疏松、内部缩孔等凝固缺陷。

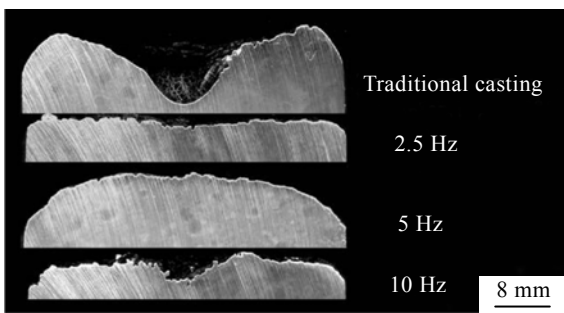


图 4 不同频率下 Mg-Gd-Y-Zr 合金铸锭顶部纵截面形貌  
Fig.4 Longitudinal section shapes of the top of as-cast Mg-Gd-Y-Zr alloy under different frequency

外加脉冲磁场会影响合金的冷却曲线，从 Mg-Gd-Y-Zr 合金的冷却曲线可看出(图 5)，脉冲磁场的施加使得合金的凝固开始温度和终了温度升高，这是由于脉冲磁场的施加会在熔体凝固过程中施加一个随时间变化的脉冲磁压强。凝固开始和终了温度的升高使得熔体凝固过程中存在一个磁过冷区，增加了整个熔体内碰撞形核的几率和数目，有利于晶粒的细化<sup>[7,10]</sup>。同时，由于脉冲磁场的搅拌作用，降低了熔体的温度梯度，使合金熔体的温度趋于均匀，减小了熔体中固相原子团簇再度熔化的趋势<sup>[11]</sup>。因此，外加脉冲磁场可使坩埚内熔体同时形核的趋势增加，更有利于细小晶粒的形成。

外加脉冲磁场在 5 Hz 条件下取得最佳细化效果，从图 4 可看出，在 5 Hz 条件下凝固后的试样顶部形成弯月面，说明该条件下脉冲磁场的施加使得熔体流动较剧烈；而在 2.5 Hz 条件下，由于单位时间内脉冲次数少，电磁力做功相应减少，使得凝固后的试样顶部呈直线型，因而在凝固过程中搅拌作用较 5 Hz 条件弱，熔体流动相对没有 5 Hz 剧烈；在 10 Hz 条件下，凝固试样的顶部可看出还有较小的缩孔，这可能是由

于频率升高，电磁场的集肤深度很小，电磁力主要集中于熔体的表面附近<sup>[11]</sup>，在相同的电磁场强度条件下，对熔体内部的强制对流作用相对减弱，电磁力使得熔体在局部范围内振动，熔体内部的流速相对较低。

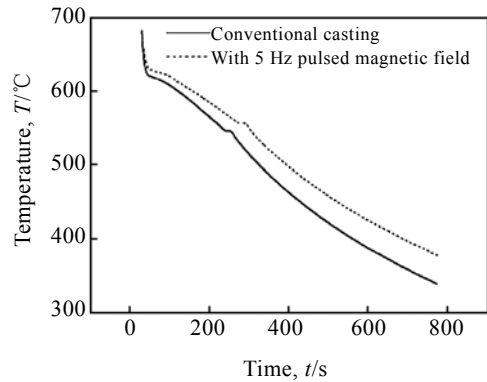


图 5 Mg-Gd-Y-Zr 合金的冷却曲线  
Fig.5 Cooling curves of the Mg-Gd-Y-Zr magnesium alloy

### 2.2 力学性能及断口分析

拉伸力学性能结果如表 1 所示。由此可见，在外加脉冲磁场条件下，其抗拉强度、延伸率均比普通铸造条件下有所提高，其中抗拉强度提高了 4.7%，延伸率提高了 78.5%。

未施加脉冲磁场 Mg-Gd-Y-Zr 合金拉伸试样断口形貌如图 6a 所示。从图可看出该断口有明显的解理断

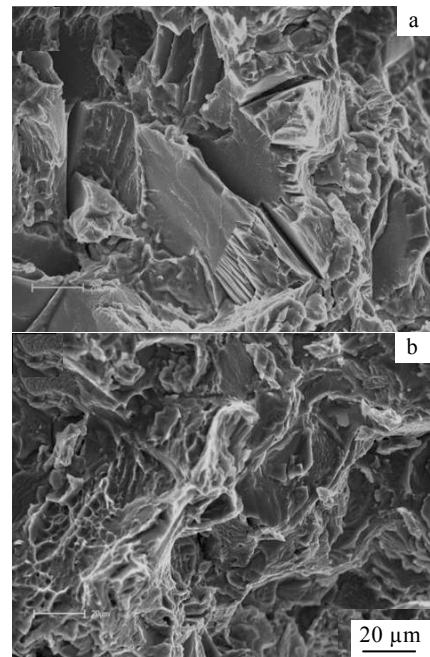


图 6 Mg-Gd-Y-Zr 合金拉伸试样断口 SEM 照片  
Fig.6 SEM fractographs of sample after tensile test in 5 Hz pulsed magnetic field: (a) 0 Hz and (b) 5 Hz

表 1 Mg-Gd-Y-Zr 合金的力学性能

Table 1 Mechanical properties of Mg-Gd-Y-Zr alloy

Conditions	Without pulsed magnetic field	With 5 Hz pulsed magnetic field
Tensile strength / MPa	227.6	238.3
Elongation / %	1.07	1.91

裂平台, 呈明显的脆性特征。图 6b 为外加 5 Hz 脉冲磁场条件下拉伸试样断口形貌。从图中可看出断面上有许多韧窝, 且韧窝的尺寸小而浅, 没有明显的解理平台, 说明断口具有一定的韧性断裂特征。

### 3 结 论

1) 脉冲磁场作用于合金熔体产生强烈的电磁搅拌效果, 一方面使熔体形成磁过冷, 另一方面降低凝固界面前熔体温度梯度, 使得 Mg-Gd-Y-Zr 合金晶粒细化。

2) 外加脉冲磁场凝固 Mg-Gd-Y-Zr 合金的抗拉强度有一定的提高, 塑性提高明显, 拉伸断口存在大量的韧窝。而未加脉冲磁场条件下凝固试样的拉伸断口有明显的解理断裂平台。

#### 参考文献 References

- [1] He S M, Zeng X Q, Peng L M *et al.* *Journal of Alloys and Compounds*[J], 2007, 427(1~2): 316
- [2] Kurota K, Mabuchi M, Higashi K. *J Mater Sci*[J], 1999, 34(10): 2255
- [3] Zi B T, Ba Q X, Cui J Z *et al.* *Scr Mater*[J], 2000, 43(4): 377
- [4] Zi Bingtao(訾炳涛), Ba Qixian(巴启先), Cui Jianzhong(崔建忠). *Acta Physica Sinica*(物理学报)[J], 2000, 49(5): 1010
- [5] Ban Chunyan, Cui Jianzhong, Ba Qixian *et al.* *Acta Metallurgica Sinica*[J], 2002, 15(4): 380
- [6] Li Qiushu, Song Changjiang, Li Haibin *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2007, 466(1~2): 101
- [7] Gao Yulai, Li Qiushu, Gong Yongyong *et al.* *Mater Lett*[J], 2007, 61(18): 4011
- [8] Wang Bin, Yang Yuansheng, Zhou Jixue *et al.* *Trans Nonferrous Met Soc China*[J], 2008, 18(3): 536
- [9] Ding Wenjiang(丁文江). *Magnesium Alloy Science and Technology*(镁合金科学与技术)[M]. Beijing: Science Press, 2006: 105
- [10] Dong Jie, Cui Jianzhong, Ding Wenjiang. *J Cryst Growth*[J], 2006, 295(2): 179
- [11] Guo Shijie, Le Qichi, Zhao Zhihao *et al.* *Materials Science and Engineering A*[J], 2005, 404(1~2): 323

## Effect of the Pulsed Magnetic Field on the Solidification and Mechanical Properties of Mg-Gd-Y-Zr Alloy

Wang Bin, Yang Yuansheng, Zhou Jixue, Tong Wenhui

(Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China)

**Abstract:** The effect of the frequency of the pulsed magnetic field on Mg-Gd-Y-Zr alloy during solidification was investigated. When the pulsed magnetic field is applied to Mg-Gd-Y-Zr alloy during the solidification process, the grain refinement is achieved. The average grain size of the as-cast Mg-Gd-Y-Zr alloy is from 65  $\mu\text{m}$  without the pulsed magnetic field to 37  $\mu\text{m}$  with the pulsed magnetic field of 5 Hz. Grain refinement of Mg-Gd-Y-Zr alloy is due to the electromagnetic undercooling and reduction of temperature gradient by the vibration of melt resulted from the pulsed magnetic field. Compared those casting method with traditional one, the tensile strength and elongation are increased by 4.8% and 78.5%, respectively.

**Key words:** pulsed magnetic field; solidified microstructure; grain refinement; Mg-Gd-Y-Zr alloy

Biography: Wang Bin, Candidate for Ph. D., Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, P. R. China, Tel: 0086-24-23971867, E-mail: binwang@imr.ac.cn