

交流磁场对 Mg-Gd-Y-Zr 合金组织和力学性能的影响

谢东原¹ 周 全¹ 陈乐平¹ 陈 舸²

(1.南昌航空大学航空制造工程学院; 2.上海航天精密机械研究所)

摘 要 利用 OM、SEM 及万能拉伸试验机等测试手段,探究了不同参数的连续交流磁场和间断交流磁场对 Mg-6Gd-3Y-0.6Zr 合金凝固组织和力学性能的影响。结果表明,连续和间断交流磁场均可细化 Mg-6Gd-3Y-0.6Zr 合金的晶粒尺寸并提高其力学性能;两种磁场处理合金的晶粒尺寸无明显差别,但间断交流磁场处理后合金的力学性能比连续交流磁场处理后的低。连续交流磁场处理条件下,在 200~600 ℃内,随着模具预热温度升高,合金晶粒尺寸逐渐减小;在 0~300 V 范围内,随着交流电压增加,合金晶粒尺寸先减小后增大,转折点为 250 V。间断交流磁场处理条件下,当放电频率在 1~10 Hz 内或占空比在 10%~40%内,随着放电频率或占空比提高,合金晶粒尺寸先减小后增大,转折点分别为 5 Hz 和 20%。

关键词 Mg-Gd-Y-Zr 合金;交流磁场;凝固组织;力学性能

中图分类号 TG146.22;TG113.25;TG391 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.08.013

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of AC Magnetic Field on Structure and Mechanical Properties
of Mg-Gd-Y-Zr Alloy

Xie Dongyuan¹, Zhou Quan¹, Chen Leping¹, Chen Ge²

(1.School of Aeronautical Manufacturing Engineering,Nanchang Hangkong University;
2.Shanghai Spaceflight Precision Machinery Institute)

Abstract: Using OM, SEM, universal tensile testing machine and other testing methods, effects of continuous AC magnetic field and intermittent AC magnetic field with different parameters on solidification structure and mechanical properties of Mg-6Gd-3Y-0.6Zr alloy were explored. The results indicate that both continuous AC magnetic field and intermittent AC magnetic field can refine grains of Mg-6Gd-3Y-0.6Zr alloy and improve its mechanical properties effectively. There is no significant difference in grain size of the alloy under the two different magnetic field treatment conditions, however mechanical properties of the alloy with intermittent AC magnetic field treatment is lower than those of ones with continuous AC magnetic field treatment. Under the condition of continuous AC magnetic field, in the range of 200~600 ℃, with the increase of mold preheating temperature, grain size of the alloy is decreased gradually. In the range of 0~300 V, with the increase of AC voltage, grain size of the alloy is decreased at first and then increased, and the turning point is 250 V. Under the condition of intermittent AC magnetic field, when the discharge frequency is 1~10 Hz or the duty cycle is 10%~40%, as the discharge frequency or duty cycle increases, grain size of the alloy is decreased at first and then increased, where the turning point is 5 Hz or 20%, respectively.

Key Words: Mg-Gd-Y-Zr Alloy, AC Magnetic Field, Solidification Structure, Mechanical Properties

镁合金因具有较高的比强度、比刚度,良好的尺寸 稳定性及优良的导电、导热性而被广泛使用^[1]。在镁合

收稿日期:2021-11-14;修改稿收到日期:2022-01-20
基金项目:上海航天科技创新基金资助项目(SAST2019-130)
第一作者简介:谢东原,男,1996 年出生,硕士研究生,南昌(330063),E-mail:xdy080300@163.com
通信作者:周全,男,1976 年出生,教授,南昌(330063),E-mail:lgclzq@sina.com
引用格式:谢东原,周全,陈乐平,等. 交流磁场对 Mg-Gd-Y-Zr 合金组织和力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(8):984-989.
XIE D Y, ZHOU Q, CHEN L P, et al. Effects of AC magnetic field on structure and mechanical properties of Mg-Gd-Y-Zr alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(8):984-989.

[13] 刘巧沐,黄顺洲,刘芳,等. B 含量对 K417G 合金凝固过程中组织演变和力学性能的影响[J]. 金属学报, 2019, 55(6): 720-728.
[14] 杨伟,夏卫,徐志锋,等. 近平衡与亚快速凝固条件下 K424 高温合金的组织演化规律[J]. 稀有金属材料与工程, 2016, 45(1): 117-121.

(编辑:刘卫)

金中添加稀土元素可以有效提高其室温和高温性能。Mg-Gd-Y-Zr 合金因其具有显著的固溶强化和时效强化特性而被广泛关注,是重要的高性能稀土合金^[2,3]。

交流磁场处理作为物理场细化合金的方法之一,具有高效、环保、易操作、细化效果好等特点^[4,5]。近年来,在镁合金凝固过程中施加交流磁场,可有效细化合金组织并改善其力学性能。胡世平等^[6]发现,当交流电压在 0~250 V 范围内增加,AZ31 镁合金的初生枝晶形貌出现先细化后粗化的现象。相比于未处理合金,其平均晶粒尺寸减小了 80%,抗压强度、压缩率最高分别提高了 26.33%、34.98%。张志强等^[7]发现,交变磁场可有效细化 AZ61 镁合金的凝固组织。当磁场频率为 30 Hz、电流为 60 A 时,铸锭中心平均晶粒尺寸由常规 DC(半连续)铸造的 276 μm 细化至 259 μm 。班春燕等^[8]发现,AZ80 镁合金经交流磁场处理后,晶粒明显细化,晶界变窄,夹杂物的尺寸显著减小。HAN H 等^[9]发现,交流磁场可有效细化含 Ca 的 AZ91 镁合金的组织。当交流电压为 100 V、Ca 含量为 0.3% 时,其平均晶粒尺寸由未处理、不含 Ca 时的 131 μm 细化至 65 μm ,布氏硬度(HB)由 51 提高至 60。ZHANG S 等^[10]发现,当交流电压在 0~200 V 内,Mg₉₇Y₂Cu₁ 合金晶粒尺寸逐渐减小,由 3.4 mm 细化至 1.7 mm,合金的抗拉强度和伸长率分别提高了 16% 和 47%。除此之外,交流磁场处理对 Al、Sn、Zn、Pb 等合金组织细化效果同样显著^[11~16]。

近年来,大量研究发现,交流磁场对粗晶类镁合金凝固组织细化效果较为显著,但对细晶类镁合金的凝固组织及力学性能的研究报道较少,特别是细晶 Mg-Gd-Y-Zr 合金。同时,传统交流磁场处理方式多为连续式,而间断磁场可大大降低功耗和生产成本。因此,本课题探究了连续式和间断式交流磁场对细晶 Mg-Gd-Y-Zr 合金晶粒和力学性能的影响,以期为该合金工业条件下凝固组织及力学性能的进一步改善提供参考。

1 试验材料与方法

试验材料为 Mg-6Gd-3Y-0.6Zr 合金(质量分数,下同),Mg 以高纯 Mg 锭(>99.9%)形式加入,Gd、Y、Zr 分别以 Mg-30Gd、Mg-30Y、Mg-30Zr 中间合金形式加入。图 1 为交流磁场装置处理示意图。交流磁场系统中,交流电压通过变压器调节,放电频率和占空比通过一个可控开关调节,可控开关由时间控制器和固态继电器组成。

采用坩埚电阻炉进行熔炼,待纯 Mg 完全熔化后,加入 Mg-30Gd、Mg-30Y 中间合金;当熔体温度达到

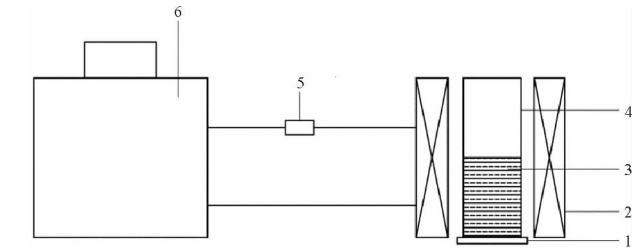


图 1 交流磁场处理装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of AC magnetic field device
1.耐火砖 2.交流电磁线圈 3.熔体 4.铸型 5.可控开关 6.变压器

760 $^{\circ}\text{C}$ 时,加入 Mg-30Zr 中间合金并保温 30 min。当熔体温度为 750 $^{\circ}\text{C}$ 时,浇入预热的不锈钢铸型中,随后启动交流磁场,直至完全凝固,试验参数见表 1。

表 1 试验工艺参数

Tab.1 Experimental process parameters					
试样 编号	交流电压/ V	模具温度/ $^{\circ}\text{C}$	磁场 类型	占空比/ %	放电频率/ Hz
1	0	200	—	—	—
2	0	400	—	—	—
3	0	600	—	—	—
4	200	200	连续	100	—
5	200	400	连续	100	—
6	200	600	连续	100	—
7	50	400	连续	100	—
8	100	400	连续	100	—
9	150	400	连续	100	—
10	250	400	连续	100	—
11	300	400	连续	100	—
12	300	400	间断	20	1
13	300	400	间断	20	2.5
14	300	400	间断	20	5
15	300	400	间断	20	10
16	300	400	间断	10	5
17	300	400	间断	30	5
18	300	400	间断	40	5

在距铸锭底部约 15 cm 处取样并对其打磨、抛光,采用质量分数为 5% 的柠檬酸进行腐蚀;利用 XJP-6A 型金相显微镜观察试样的初生相形貌;利用 S-Viewer 软件采用截线法对晶粒尺寸进行测量;按照 GB6397-86 制备拉伸试样,并利用 WDW-200D 万能试验机对试样进行拉伸性能测试,拉伸速度为 1 mm/s,拉伸试样尺寸见图 2。

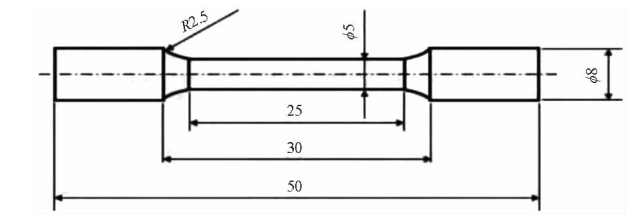


图 2 拉伸试样尺寸

Fig.2 The size of tensile sample

2 试验结果与分析

2.1 Mg-6Gd-3Y-0.6Zr 合金的凝固组织

图 3 分别为未处理、连续和间断交流磁场处理条件下 Mg-6Gd-3Y-0.6Zr 合金典型的初生相和第二相形貌。可以看出,未处理时,合金初生晶粒呈较为粗大的

球状,其第二相多数呈颗粒状,少数呈条状;连续交流磁场处理后,初生相仍为球状,但明显细化,其颗粒状第二相数量和尺寸均减小,条状第二相数量增多且更为均匀地分布在晶界处;间断交流磁场处理后,初生相形貌和第二相的数量、均匀性与连续交流磁场处理相似,其平均晶粒大小相较于连续交流磁场基本相同,但其晶粒大小分布略有不均。

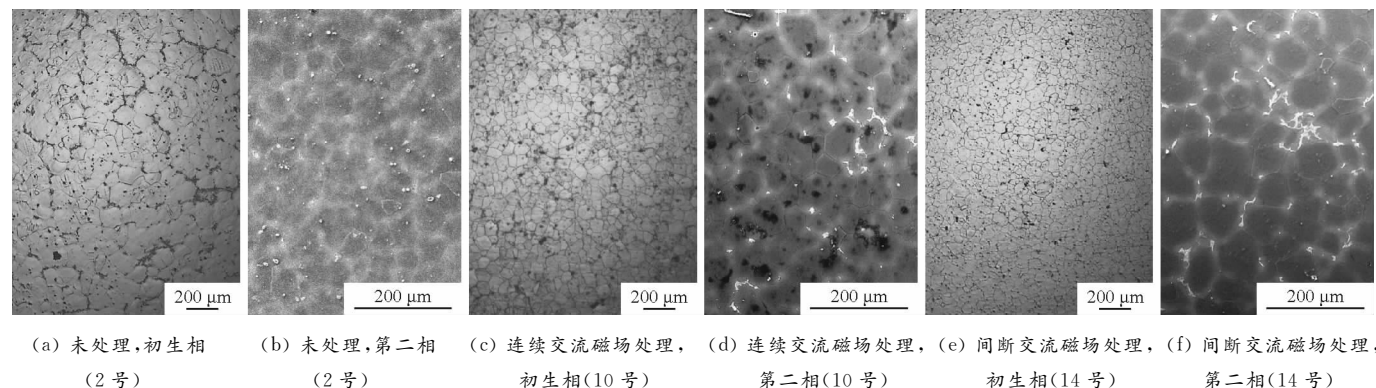


图 3 Mg-6Gd-3Y-0.6Zr 合金典型的凝固组织

Fig.3 Typical solidification structure of Mg-6Gd-3Y-0.6Zr alloy

图 4 为不同处理方式对 Mg-6Gd-3Y-0.6Zr 合金晶粒尺寸的影响。可以看出,连续和间断交流磁场均可有效细化合金晶粒且细化效果无明显差别。与未处理合金相比,连续交流磁场和间断交流磁场处理后,晶粒尺寸分别下降了 45.9% 和 44.7%。

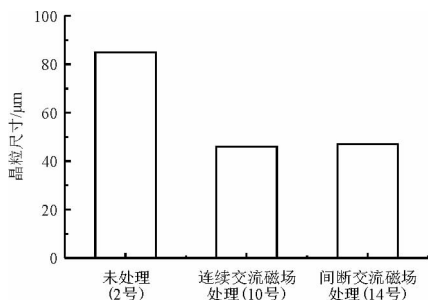


图 4 不同处理方式下 Mg-6Gd-3Y-0.6Zr 合金的晶粒尺寸

Fig.4 Effects of different treatments on the grain size of Mg-6Gd-3Y-0.6Zr alloy

图 5 为连续交流磁场处理条件下模具预热温度和交流电压对 Mg-6Gd-3Y-0.6Zr 合金晶粒尺寸的影响。可以看出,交流磁场处理前后,合金晶粒尺寸均随着模具预热温度的升高而增大;在相同模具预热温度下,交流磁场处理后的合金晶粒尺寸更小。在 0~300 V 范围内,随着交流电压逐渐增加,合金晶粒尺寸先减小后增大,转变点为 250 V。

图 6 为间断交流磁场处理条件下放电频率和占空比对 Mg-6Gd-3Y-0.6Zr 合金晶粒尺寸的影响。可以看出,在 0~10 Hz 内,随着放电频率逐渐提高,合金的晶粒尺寸先减小后增加,转折点为 5 Hz;在 10%~40% 范

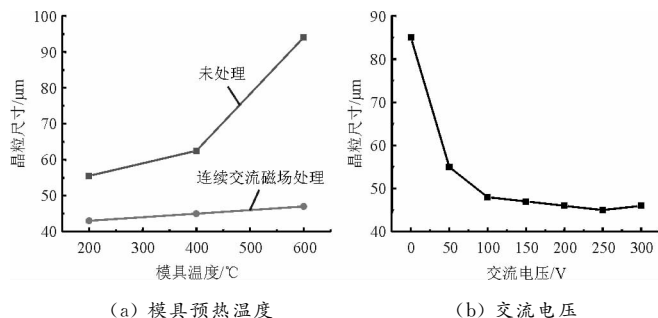


图 5 连续交流磁场对 Mg-6Gd-3Y-0.6Zr 合金晶粒尺寸的影响
Fig.5 Effects of continuous AC magnetic field on the grain size of Mg-6Gd-3Y-0.6Zr alloy

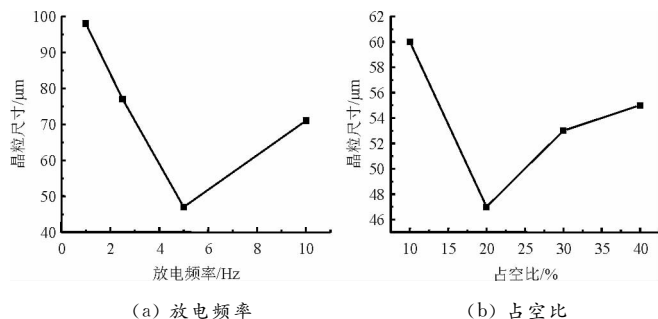


图 6 间断交流磁场对 Mg-6Gd-3Y-0.6Zr 合金晶粒尺寸的影响
Fig.6 Effects of intermittent AC magnetic field on the grain size of Mg-6Gd-3Y-0.6Zr alloy

围内,随着占空比逐渐提高,其晶粒尺寸先减小后增加,转折点为 20%。

2.2 力学性能

图 7 为未处理、连续和间断交流磁场处理对 Mg-6Gd-3Y-0.6Zr 合金力学性能的影响。可以看出,连续

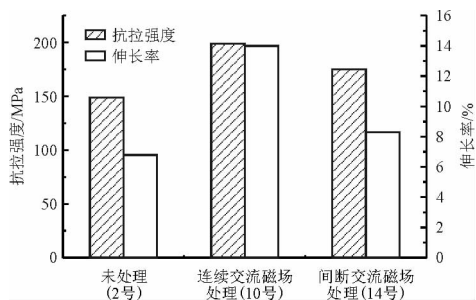
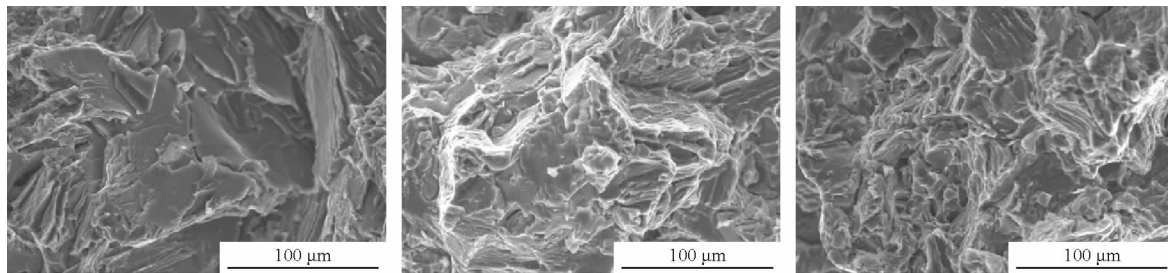


图7 不同处理方式对 Mg-6Gd-3Y-0.6Zr 合金性能的影响

Fig.7 Effects of different treatments on the properties of Mg-6Gd-3Y-0.6Zr alloy



(a) 未处理 (2号)

(b) 连续交流磁场处理 (10号)

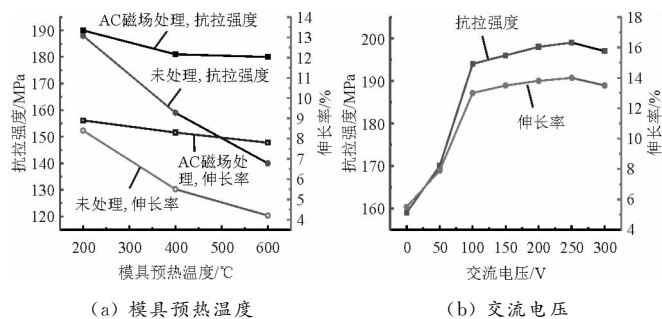
(c) 间断交流磁场处理 (14号)

图8 Mg-6Gd-3Y-0.6Zr 合金典型的断口组织形貌

Fig.8 Typical fracture structure morphologies of Mg-6Gd-3Y-0.6Zr alloy

连续交流磁场处理和间断交流磁场处理后的合金仍为准解理断裂,但其断口处解理面和解理台阶变小,撕裂棱增多且呈各向异性。

图9为连续交流磁场处理条件下模具预热温度和交流电压对 Mg-6Gd-3Y-0.6Zr 合金力学性能的影响。可以看出,交流磁场处理前后,其抗拉强度及伸长率均随着模具预热温度的升高而降低;在相同模具预热温度下,交流磁场处理后的合金抗拉强度及伸长率更高。在 0~300 V 内,随着交流电压逐渐提高,其抗拉强度和伸长率总体呈先上升后下降的趋势,转折点为 250 V。



(a) 模具预热温度

(b) 交流电压

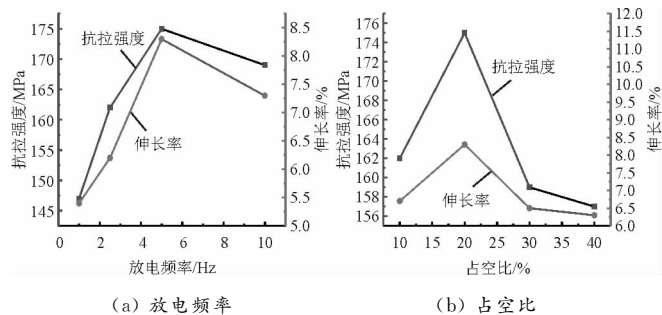
图9 连续交流磁场对 Mg-6Gd-3Y-0.6Zr 合金力学性能的影响
Fig.9 Effects of continuous AC magnetic field on mechanical properties of Mg-6Gd-3Y-0.6Zr alloy

图10为间断交流磁场处理条件下放电频率和占空比对 Mg-6Gd-3Y-0.6Zr 合金力学性能的影响。可以看出,在 1~10 Hz 内,随着放电频率逐渐提高,其抗拉强度和伸长率先上升后下降,转折点为 5 Hz。随着占空比逐渐提高,其抗拉强度和伸长率先上升后下降,转折

交流磁场和间断交流磁场均可提高合金的力学性能,但间断交流磁场处理后合金的力学性能比连续交流磁场处理后的低。相比于未处理的合金,连续交流磁场处理合金的抗拉强度和伸长率分别提高了 33.6% 和 105.9%,间断交流磁场处理后其抗拉强度和伸长率分别提高了 17.4% 和 22.1%。

图8为未处理、连续和间断交流磁场处理条件下 Mg-6Gd-3Y-0.6Zr 合金典型的拉伸断口形貌。可以看出,未经处理的合金断口处存在较大的解理面和解理台阶,少量撕裂棱,呈准解理断裂特征,表现为脆性断裂。

点为 20%。



(a) 放电频率

(b) 占空比

图10 间断交流磁场对 Mg-6Gd-3Y-0.6Zr 合金力学性能的影响
Fig.10 Effects of intermittent AC magnetic field on mechanical properties of Mg-6Gd-3Y-0.6Zr alloy

2.3 分析与讨论

2.3.1 交流磁场对合金凝固组织的影响机制

交流磁场作用于合金熔体中,主要通过产生电磁搅拌效应和焦耳热效应影响合金的凝固组织^[17]。电磁搅拌主要通过改变形核率、机械破碎、枝晶臂熔断、再结晶 4 种方式影响合金的凝固组织。焦耳热效应主要通过使形核过程持续进行和延长合金冷却速率两方面影响合金的凝固组织。

经过 Zr 细化后的 Mg-6Gd-3Y 合金初生晶粒较小,晶粒呈球状。交流磁场产生的电磁搅拌无法产生对合金初生枝晶和次生枝晶臂折断、破碎的作用,因此交流磁场主要通过提高合金形核率来细化合金的凝固组织。交流磁场提高合金形核率主要有 3 个方面:第一,交流

磁场在熔体内部产生的洛伦兹力可加剧熔体中的对流, 可视的交流磁场对熔体做正功, 则 $\Delta G'_b > 0$, 所以:

$$\Delta G_b - \Delta G'_b < \Delta G_b$$

式中, ΔG_b 为原子团簇在固液界面处的跳跃过程中, 由液相到固相需要克服的势垒; $\Delta G'_b$ 为环境对熔体做功时固液界面处原子团簇输运势垒的改变量。由上式可知, 原子团簇由液相向固相迁移所需的势垒比没有磁场作用时低, 表明在交流磁场作用下, 原子团簇由液相向固相迁移更易实现。同时电磁搅拌引起的强制对流可以使金属熔体的热传导增加, 带走了熔体大部分热量, 使得熔体过冷度增加, 从而使其形核率增加; 第二, 交流磁场产生的焦耳热使形核过程持续进行, 提高了形核率; 第三, 型壁晶粒相互连接形成的凝固壳层阻碍了型壁处晶核的游离, 电磁搅拌可在形壳前有效促进型壁处晶核的游离, 使其散落在熔体内部, 提高了形核率。

在连续交流磁场条件下, 随着模具预热温度升高, 虽然磁场对合金作用时间逐渐延长, 有利于晶粒的细化, 但合金冷却速度逐渐降低, 使得晶粒得以继续生长, 导致合金晶粒尺寸最终逐渐增大。当模具温度低于 400 °C 时, 合金冷却速度较快, 模具内壁与合金熔体之间瞬间形成一层凝固层, 晶核游离作用效果下降, 进而减弱了交流磁场中电磁搅拌作用, 所以相比于未处理的合金, 交流磁场细化合金晶粒的效果较弱。当模具温度为 600 °C 时, 模具内壁与合金熔体之间的凝固层形成较慢, 使得电磁搅拌作用效果增强, 进而导致更多游离的晶核散落在熔体内部, 提高了形核率, 此时合金晶粒细化效果更为明显。在 0~250 V 内, 随着交流电压逐渐提高, 交流磁场对熔体做的功逐渐增加, 磁场产生的焦耳热逐渐增加, 电磁搅拌引起的对流作用逐渐增大, 合金的形核率增加, 使其晶粒逐渐细化。当交流电压达到 300 V 时, 交流磁场产生的焦耳热过多, 合金冷却速率有所下降, 晶粒生长时间延长, 交流磁场处理细化效果减弱, 使合金晶粒略有粗化。

间断交流磁场对合金熔体既可以产生连续交流磁场的细化效果, 又可以产生类似于脉冲磁场的冲击和振荡作用。这种冲击和振荡作用一方面加速了型壁处异质形核的振落, 并使其散落在熔体内部, 提高了形核率; 另一方面又加速了金属熔体在凝固过程中的散热, 使得熔体的过冷度进一步增加, 也提高了形核率。此外, 间断交流磁场产生的能量仅为连续交流磁场的 10%~40%, 所以在提高电磁搅拌和电磁振荡作用的同时降低了能耗, 减弱了焦耳热效应对晶粒生长的不利影响。当放电频率在 1~5 Hz 内, 随着放电频率提高, 一方面在相同时间内, 冲击和振荡的次数逐渐增加, 另一方面振荡频率可能逐渐与晶粒的共振频率接近, 有利于型壁处

细小晶粒的脱离, 使其游离作用增强, 从而使得合金形核率逐渐提高, 晶粒逐渐细化。当放电频率达到 10 Hz 时, 冲击振荡频率可能超过晶粒共振频率, 冲击和振荡作用减弱, 晶粒有所粗化。在 10%~20% 内, 随着占空比提高, 电磁搅拌及冲击和振荡作用逐渐增强, 合金的形核率提高, 晶粒逐渐细化; 当占空比达到 30% 以上时, 交流磁场累计作用时间逐渐增加, 产生的焦耳热增多, 导致合金冷却速度降低, 合金晶粒逐渐粗化。由于交流磁场采用间断式工作方式, 在磁场非工作时间部分晶粒可能会继续生长, 使得间断交流磁场处理后的合金晶粒大小略有不均。

Mg-6Gd-3Y-0.6Zr 合金第二相的分布主要受合金晶粒晶界的影响。由于第二相主要分布在晶界处, 因此均匀、细小的等轴晶有利于改善第二相的分布, 即晶粒尺寸越小, 分布在合金晶界处的第二相便越均匀。未处理时, 合金晶粒较为粗大, 导致其均匀性较差; 连续或间断交流磁场处理后, 初生 α -Mg 相得到细化, 第二相分布更为均匀。

2.3.2 交流磁场对合金力学性能的影响机制

Mg-6Gd-3Y-0.6Zr 合金的力学性能主要受其晶粒尺寸的影响。合金晶粒尺寸越小, 其力学性能越高。这是因为: 一方面, 由 Hall-Petch 公式可知, 合金平均晶粒尺寸越小, 合金强度越高; 另一方面, 晶粒尺寸越小, 使得第二相分布越均匀, 也导致合金力学性能提高。该合金第二相由 $Mg_{24}Y_5$ 相组成, 细小弥散且均匀地分布在晶界处, 可有效强化基体、提高合金的力学性能。

对于连续交流磁场, 随着模具预热温度升高, 合金晶粒尺寸逐渐增大, 合金力学性能逐渐降低。在 0~250 V 内, 随着交流电压增加, 合金晶粒尺寸逐渐减小, 因此其力学性能逐渐提高; 当交流电压达到 300 V 时, 合金晶粒尺寸有所增加, 其力学性能下降。

在间断交流磁场条件下, 当放电频率在 1~10 Hz 内或占空比在 10%~40% 内, 随着间断交流磁场放电频率或占空比的逐渐提高, Mg-Gd-Y-Zr 合金晶粒尺寸先减小后增加, 导致合金的力学性能先提高后降低。间断式交流磁场处理后的晶粒尺寸大小略有不均, 同时其产生的冲击和振荡在合金凝固过程中可能会产生一定的吸气、氧化作用, 使合金产生一定的缺陷, 所以在相同晶粒细化条件下, 与连续交流磁场相比, 间断交流磁场处理合金的力学性能较低。

3 结 论

(1) 连续交流磁场和间断交流磁场均可有效细化 Mg-6Gd-3Y-0.6Zr 合金晶粒尺寸并提高其力学性能。

两种磁场处理条件下,其晶粒尺寸无明显差别,但间断交流磁场处理合金的力学性能比连续交流磁场处理合金的力学性能低。

(2)连续交流磁场处理条件下,在 200~600 ℃内,随着模具预热温度升高,Mg-6Gd-3Y-0.6Zr 合金晶粒尺寸逐渐降低;在0~300 V 内,随着交流电压增加,其晶粒尺寸先减小后增加,转折点为 250 V。

(3)间断交流磁场处理条件下,当放电频率在 1~10 Hz 内或占空比在 10%~40%内,随着放电频率或占空比提高,合金晶粒尺寸先减小后增加,转折点分别为 5 Hz 和 20%。

参 考 文 献

- [1] 吴国华,陈玉狮,丁文江. 镁合金在航空航天领域研究应用现状与展望[J]. 载人航天, 2016, 22(3): 281-292.
- [2] JIANG R, QIAN S N, DONG C, et al. Composition optimization of high-strength Mg-Gd-Y-Zr alloys based on the structural unit of Mg-Gd solid solution[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2021, 72(3): 81-88.
- [3] 王腾达,周洋,王鹏云,等. Gd 含量对 Mg-Gd-Y-Zr 镁合金的组织及耐蚀性能的影响[J]. 材料开发与应用, 2020, 35(6): 30-35.
- [4] CHUL L S, BOK L H, CHON K H. The rheocasting engineering development by the electromagnetic stirring[J]. Journal of Korea Foundry Society, 2005, 25(4): 151-155.
- [5] WANG Y, ZHAO C, ZUO G, et al. Effects of low frequency electromagnetic field on solidification of 7050 aluminium alloy during hot top casting[J]. Materials Science and Technology, 2009, 25(10): 1 207-1 210.
- [6] 胡世平,陈乐平,周全,等. 交流磁场对 AZ31 镁合金凝固组织和压缩性能的影响[J]. 热加工工艺, 2018, 47(15): 62-65.

- [7] 张志强,王占坤,尹思奇,等. 复合物理场对 AZ61 镁合金半连续铸造凝固组织的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2016, 45(9): 2 385-2 390.
- [8] 班春燕,刘恋,姜丹丹,等. 磁场对 AZ80 镁合金凝固组织的影响[J]. 材料热处理学报, 2011, 32(12): 13-16.
- [9] HAN H, LIU S, KANG L, et al. Refinement role of electromagnetic stirring and strontium in AZ91 magnesium alloy[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2008, 23(2): 194-197.
- [10] ZHANG S, ZHOU Q, ZHANG H. Effect of AC magnetic field on solidified structure and mechanical properties of Mg₉₇Y₂Cu₁ alloy [J]. Advanced Materials Research, 2015, 3 683: 561-566.
- [11] GAO Z H, XU J, ZHANG Z F, et al. Effect of annular electromagnetic stirring on microstructure and mechanical property of 7075 aluminium alloy[J]. Materials Science Forum, 2013, 2 234: 75-81.
- [12] YI H, BAN C, GUO S, et al. Alignment behavior of primary Al₃Fe phase in Al-Fe alloy under a high magnetic field[J]. Materials Letters, 2007, 61(4-5): 983-986.
- [13] 张建锋,乐启炽,崔建忠. 交流磁场对 Sn-20Pb 合金电阻的影响[J]. 金属学报, 2013, 49(1): 101-106.
- [14] 陈飞,曹志强,曹安琪,等. 旋转磁场对 Zn-7Cu-0.25Mn 合金水平连铸坯组织性能的影响[J]. 武汉科技大学学报, 2015, 38(1): 12-15.
- [15] 郭建设,潘志林,樊洋. 螺旋磁场对 Pb-80Sn 合金凝固组织的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2014, 34(8): 860-864.
- [16] PENG J, WANG E, HUI L, et al. Effect of electromagnetic field on micro-structure and mechanical property for inconel 625 super-alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2013, 49(12): 1 573-1 580.
- [17] 谭水淋,周全,章森,等. 复合磁场对 Mg₉₇Y₂Cu₁ 合金凝固组织的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2014, 34(10): 1 027-1 031.

(编辑:张正贺)

碳纳米纤维增加铝复合材料硬度

近日,俄罗斯科研人员将碳纳米纤维添加到铝基复合材料中,使铝基复合材料的硬度提高了 20%,材料结构在微观层面上也发生了极大变化。有关专家指出,该研究不仅改善了特定铝合金的性能,而且对许多铝及其合金部件具有极大的实际意义。

俄罗斯国家研究型技术大学碳氢化合物催化和加工实验室研究员伊万·佩列文称:“根据最严格的要求,只有两种方法可提高合金的使用性能,一是创造一种成分更复杂的新型复合材料,二是通过施加额外的涂层来处理成品的表面。我们把这两种方法结合起来,在微米级氧化铝和纳米级碳纤维相互作用时实现了几个因素的协同效应。”

伊万·佩列文表示,以铸造和 3D 打印的铝样品为基础,通过采用冷喷涂法施加复合涂层可提高其表面性能。该复合涂层的基础是用于获取铝的工业原材料粉末状混合物,并添加了 30%的纯金属颗粒。在合成过程中,铝颗粒在遇到较硬的氧化物时会被压碎,从而填充其结构中的空隙。这种硬质和塑料颗粒的组合物为铝零件表面上的涂层提供了牢固的黏合。另外,纳米级碳纤维渗透进金属粉末颗粒的空间中,进一步增加微观层面的密度,极大地减少裂缝和空隙的数量,可提高涂层的硬度和强度,仅添加 1.5%的碳纳米纤维就会让涂层硬度提高了 20%。

(摘自中国有色金属报)