

温度场对电磁搅拌镁合金组织和性能的影响

战 春, 于宝义, 郑 黎, 于博宁

(沈阳工业大学材料科学与工程学院, 辽宁沈阳 110870)

摘要: 采用数值模拟结合试验的方式探究旋转磁场条件下温度场对AZ31镁合金组织性能的影响。在旋转磁场作用下, 液态AZ31镁合金随着温度的降低流动速度先增加后减小, 且越靠近边缘流速越小。由于凝固时温度变化, 管坯晶粒在沿径向上有边缘粗大中间细小的分布规律, 力学性能也随之有着边缘低中间高的体现。空气冷却与水冷却性能对比表明, 水冷却有助于晶粒细化和控制第二相分布, 使力学性能得以提升。

关键词: 电磁搅拌; 凝固流场; 冷却温度场; 晶粒细化; 镁合金

镁合金质量轻、易再生利用以及性能优良, 引起各个国家的重视和研究开发, 镁制品许多领域都得到了应用^[1], 成为继铁、铝、铜之后重要的工程材料。在广泛应用的金属材料中, 镁及其合金的密度较小, 其密度是钢的1/4, 铝的2/3, 是目前实用金属中最轻的有色金属, 不仅具有很高的比强度和比刚度, 而且还具有良好的阻磁性、铸造性能以及切削加工性能^[2]。同时它可以回收, 被誉为“21世纪绿色环保工程材料”, 在航空航天、交通、通讯以及电器等需要减轻机件自重的领域有着广泛的应用前景^[3]。近些年, 随着航空航天和汽车等领域的快速发展, 镁合金的用途越来越广, 各领域对镁合金的性能要求越来越高, 所以在高强度新型镁合金材料的研发与制备上仍是今后科研的重点。在材料科学领域中, 控制材料的凝固成形过程, 对进一步提高材料性能和研发新材料都具有深远意义。利用磁场来控制金属的凝固过程是近年来的一项新技术^[4]。由于该技术具有清洁环保、不破坏合金原有成分, 以及操作方便等一系列优点, 因此得到众多科研人员及产品制造商的青睐。在组织细化和凝固过程的控制上也是一种可行方案, 这对于提升合金综合性能具有深远意义^[5]。

近些年来, 众多学者研究了电磁搅拌技术在镁合金方面的应用。韩辉^[6]等人研究了旋转磁场对AZ91镁合金组织的影响, 发现电磁搅拌可以细化组织, 使枝晶组织向球团状演变, 并改善力学性能。崔建忠^[7]将电磁搅拌连续铸造技术应用于镁合金凝固过程, 研究表明电磁搅拌可以使晶粒细化, 消除宏观偏析, 提高合金元素在晶内的固溶度, 并改善表面质量和减少铸造内应力, 防止内部裂纹的产生。冯小平^[8]研究旋转磁场对AZ81组织与性能的影响, 发现磁场激励电压升高(0~70 V), 晶粒细化, β -Mg₁₇Al₁₂相尺寸减小, 力学性能增加。AZ31镁合金^[9]、AZ91镁合金^[10]、以及ZK60镁合金^[11]等经频率15 Hz、磁场电流0~10 A、磁场强度<1 T搅拌后, 晶粒明显细化, 力学性能提高。此外, 电磁搅拌还可提高溶质元素的溶解度, 溶入基体中的溶质元素可以起到固溶强化的作用, 在宏观上使材料的强度得到提高。可见不同条件的电磁搅拌对于镁合金来说都有细化均匀晶粒、改善组织和力学性能的作用。

1 试验

1.1 试验材料

本文所用试验合金为AZ31, 合金成分如表1。

作者简介:

战 春(1991-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向材料成形工艺及过程控制。E-mail: 760645606@qq.com

中图分类号: TG456
文献标识码: A
文章编号: 1001-4977(2019)07-0711-07

基金项目:
辽宁省自然科学基金
(20170540683)。
收稿日期:
2019-01-11 收到初稿,
2019-03-01 收到修订稿。

1.2 试验过程

将坩埚内表面及所有与镁合金溶液接触到的试验器具表面涂刷无水乙醇与ZnO混合的涂料，并放置于干燥处直至完全干燥；将所用型芯（砂芯）和模具放入箱式炉中预热，温度设置为250℃，模具如图1所示。连接气体保护装置，保护气为N₂和SF₆，比例为1:99，并检验连接后的气密性，保证没有气体外漏之后，按所需比例调好流量计。将坩埚放入坩埚炉中，通电预热，坩埚炉温度设置为650℃，预热30 min。打开气体装置向坩埚炉中通入气体排出空气，坩埚炉温度设置为720℃，在升温过程中放入AZ31镁合金进行熔炼。浇注时，将坩埚从坩埚炉中取出，并把预热中的型芯（砂芯）和模具取出，组合放入电磁搅拌器中，插入热电偶，位置如图1。打开水冷系统和电磁搅拌器，设置相应的搅拌参数，使电磁搅拌器正常运转，电磁搅拌时间为2 min，搅拌完成后取出模具与铸件，对铸件实施空气冷却和25℃水中冷却。将铸坯按工艺编号，用线切割机器在沿铸件径向方向上切下若干性能试样，并沿一定方向标上编号，中间部位为试件B，两侧分别为A和C，其尺寸大小为50 mm × 10 mm × 3 mm。对试样进行打磨处理，去掉表面氧化皮，利用材料万能试验机进行速率为0.2 mm/min的拉伸试验，拉伸试件如图2所示。在拉伸试样相同位置处切割金相试样，经研磨、抛光后，用配比为0.5 g苦味酸，1 mL冰乙酸、1 mL蒸馏水、7 mL酒精的腐蚀液腐蚀，腐蚀时间为10 s，腐蚀后用酒精清洗表面，用风筒吹干即可观察其显微组织，金相试样如图3。

2 试验结果与分析

2.1 力学性能与金相组织

对相同参数合金试件沿径向不同位置进行了力学性能测试，最后将冷却条件对铸坯性能的影响进行了分析。

2.1.1 铸坯不同部位的力学性能

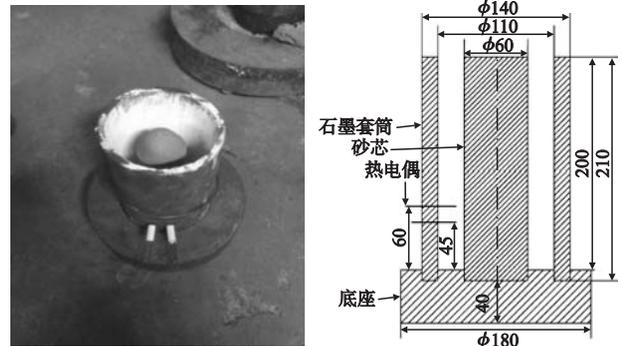
图4为AZ31镁合金铸坯沿径向方向不同部位的力学性能。可以看出，AZ31镁合金铸件在内表面部位、中间部位和外表面部位的抗拉强度分别为172 MPa、180 MPa和170 MPa，断后伸长率分别为10.1%、12%和10%。在电磁搅拌条件下，AZ31镁合金铸件中间部位的性能最好，内表面和外表面部位的力学性能相差不大。为了验证电磁搅拌镁合金沿径向性能规律的准确性，除150A-6Hz工艺参数外，又选取了90A-6Hz与120A-6Hz条件下的管坯进行性能对比。结果表明，150A-6Hz条件下综合性能最佳，90A-6Hz与120A-6Hz管坯沿径向的性能规律与150A-6Hz条件下规律相同。根据此规律可判断，未加磁场管坯性能要比加磁场条件下管坯性能差。

2.1.2 铸坯不同部位的金相组织

由试验结果可知经过电磁搅拌的AZ31镁合金铸坯其中间部位的性能最好，且在150A-6Hz条件下性能最优。为了观察组织更为清晰方便，选择最优参数进行组织观察，又因为内、外表面部位的性能相差不大，所以选用任意边缘部位和中间部位的金相组织进行对比。图5为铸件中间部位和边缘部位的100倍金相组织。通过对比可以发现，中间部位（图5a）的晶粒尺寸较为细小均匀，平均晶粒尺寸大约为80 μm；边缘

表1 AZ31镁合金的化学成分
Table 1 Chemical composition of AZ31 magnesium alloy

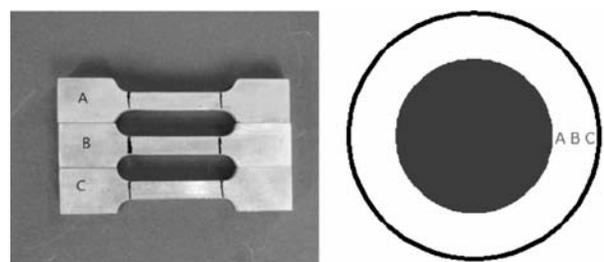
w _B /%			
Al	Zn	Mn	Mg
3.001	0.805	0.312	余量



(a) 模具装配实物图 (b) 模具装配二维图

图1 浇注模具

Fig. 1 Casting mould



(a) 试样实物 (b) 切割位置

图2 力学性能试样

Fig. 2 Specimens for testing mechanical properties



图3 金相试样

Fig. 3 Metallographic specimen

部位 (图5b) 晶粒尺寸较为粗大且大小分布不均, 平均晶粒尺寸为150 μm 。

2.1.3 冷却方式对AZ31镁合金性能的影响

本试验采用了经电磁搅拌后的镁合金铸坯刚凝固后进行空气冷却和水冷却的方式, 探究冷却方式对AZ31镁合金性能的影响。空冷和水冷件的抗拉强度分别为180 MPa和186 MPa, 断后伸长率分别为12%和13.5%。可以看出, 经过水冷的镁合金铸件抗拉强度和断后伸长率都得到了提升, 说明凝固后施加水冷可以

提升AZ31镁合金的性能。

2.1.4 不同冷却方式对合金组织的影响

图6为空冷和水冷后AZ31镁合金铸件金相组织。可以看出, 经电磁搅拌后在进行水冷的AZ31镁合金铸件晶粒相比于空冷条件明显细小。

2.2 结果分析

2.2.1 凝固温度场对AZ31镁合金组织和性能影响

液态镁合金在旋转磁场作用下会旋转的根本原因

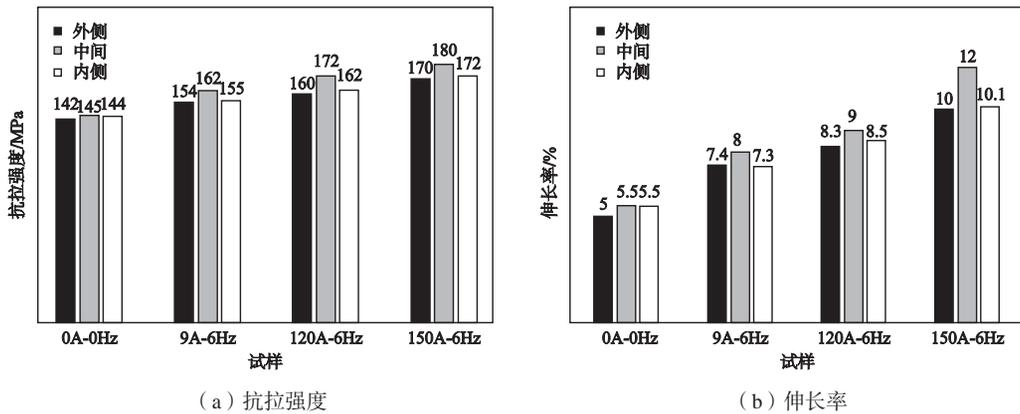
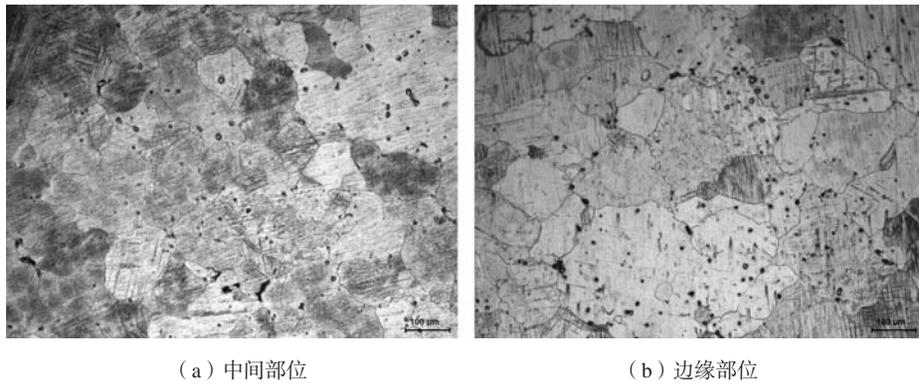


图4 沿径向方向的力学性能

Fig. 4 Mechanical properties along the radial direction

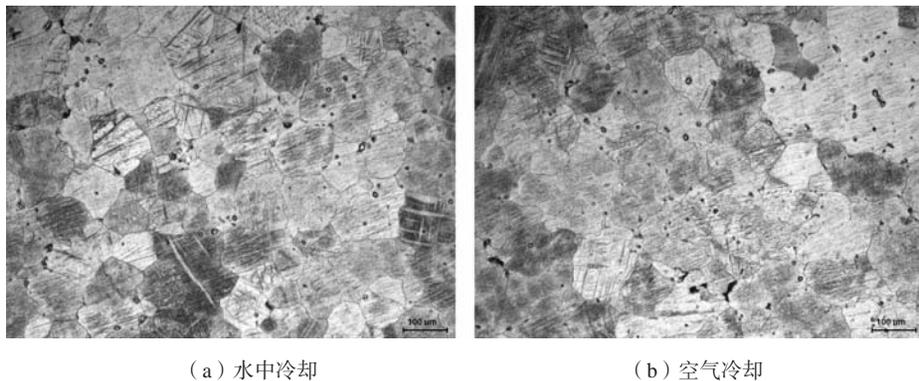


(a) 中间部位

(b) 边缘部位

图5 铸件不同部位金相组织

Fig. 5 Metallographic structure at different locations of casting



(a) 水中冷却

(b) 空气冷却

图6 不同冷却条件金相组织

Fig. 6 Metallographic structure of AZ31 casting with different cooling conditions

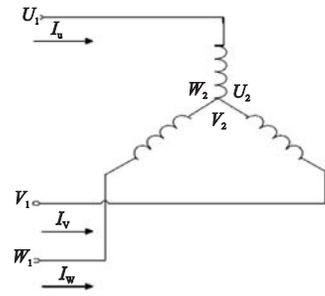
是洛伦兹力的作用^[5]。对凝固温度场研究之前要对旋转磁场进行研究。利用Maxwell模拟旋转磁场,根据搅拌器参数进行设定线圈匝数为104匝,内部接线方式及搅拌器结构简图如图7所示。三相电分别用 U 、 V 、 W 表示,各相电流的相位差为 $2\pi/3$,当三相绕组线圈的三个接头分别通入对称的低频三相电流时,在电磁搅拌器内部将产生三相一极对旋转磁场。根据试验结果在150A-6Hz条件下所得管坯性能最优,因此选用该参数进行模拟。模具摆放位置位于搅拌器中间,为了保证洛伦兹力完全作用于整个熔体,模具顶部不可超出搅拌器(如图8所示),加载方式为函数。公式(1)-(3)中, I_u 、 I_v 、 I_w 为绕组线圈中的瞬时电流, I_m 为交流电幅值, f 为电流频率, t 为时间。

$$I_u = I_m \sin(2\pi ft) \quad (1)$$

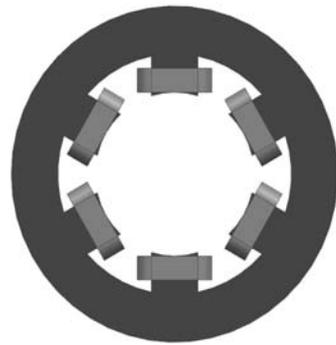
$$I_v = I_m \sin(2\pi ft - 2\pi/3) \quad (2)$$

$$I_w = I_m \sin(2\pi ft + 2\pi/3) \quad (3)$$

感应电流所产生的磁场强度及方向维持在一定范围之内推动合金转动,这种合金液的转动对合金液的凝固产生影响^[6]。数值模拟在模具处产生的磁感应强度云图如图9所示,由模拟结果可知,不同时刻的磁感应强度大致相同,最大为0.2 T,最小为0.19 T。将磁场模拟结果与workbench进行耦合,可观察在该旋转磁场条件下液态镁合金的流动与传热。在洛伦兹力的作用下产生流场,流场变化云图如图10所示,洛伦兹力分布如图11所示。在镁合金凝固过程中合金液的流速会随着合金液的粘度增大而减小,搅拌初期由于合金液的惯性使得合金流速较小,模具温度远远低于金属液温度,使得靠近模具处的金属液在0.1~1 s内温度迅速下降,利用workbench模拟流速变化和温度场变化如图10、图12所示。由试验结果可知,靠近边缘部分的镁合金性能相对较差,根据模拟结果所示,合金熔体是沿着砂芯和外部模具套筒逐步向中间逐层凝固的过程,在浇注初期合金流速较小,搅拌强度较弱,由于边缘部分靠近低温模具使得合金迅速形核长大,



(a) 三相绕组星形接法



(b) 电磁搅拌器结构简图

图7 内部接线方式及搅拌器结构简图

Fig. 7 Schematic diagram of internal wiring mode and agitator structure

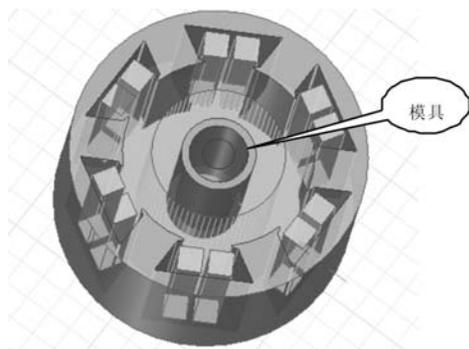
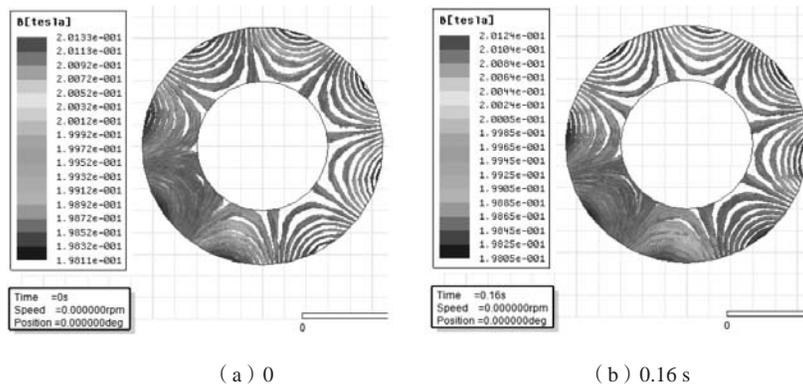


图8 电磁搅拌器模型图

Fig. 8 Model diagram of an electromagnetic agitator



(a) 0

(b) 0.16 s

图9 磁感应强度云图

Fig. 9 Cloud chart of magnetic induction intensity

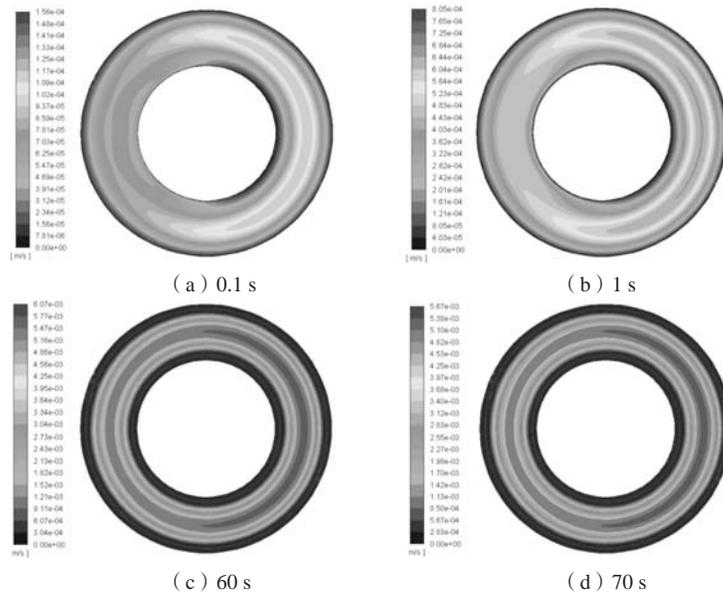


图10 流场变化云图

Fig. 10 Cloud chart of flow field variation

低的流速不足以打断枝晶。随着时间的增加，流速变快，搅拌强度增大，使得偏离边缘部位的枝晶破碎，破碎的枝晶进入为凝固的熔体作为形核质点促进异质形核，其中较小的枝晶在高温熔体的作用下被重新熔化，大的枝晶作为核心得以保留。

2.2.2 冷却条件对AZ31镁合金组织性能影响

本文所设定冷却条件为两种：一是在电磁搅拌完成浇注进行空气冷却；二是在电磁搅拌条件完成，管坯温度下降至437 ℃时进行水中冷却。空气中冷却速率要小于水中冷却速率，利用热电偶对150A-6Hz凝固过程温度变化进行测试如图13所示。由图13可以得知，

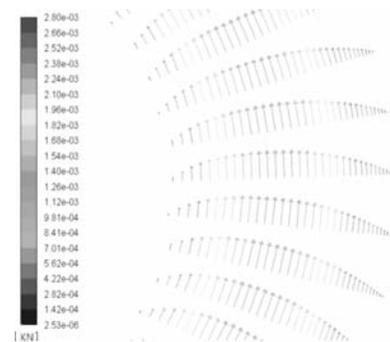


图11 洛伦兹力分布

Fig. 11 Lorentz force distribution

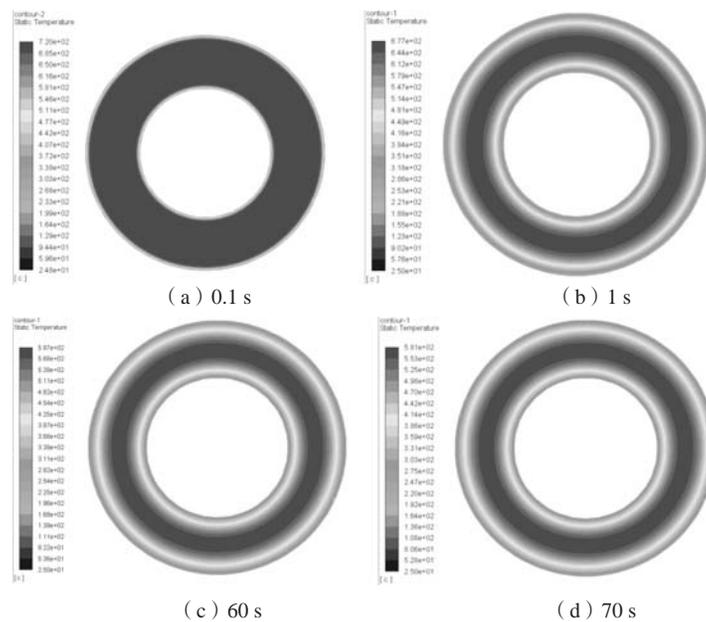


图12 温度场变化云图

Fig. 12 Cloud chart of temperature field change

镁合金在凝固过程中存在两个拐点，其中第一个拐点为液固转变温度。当低于622℃时，合金液中开始析出固相，第二个拐点为共晶反应温度^[16]，在该温度时镁合金基体中析出第二相 β -Mg₁₇Al₁₂。根据结果可知，水冷条件下的性能优于空冷条件下的性能，这是由于在共晶转变温度处进行水冷可抑制第二相的析出，在水冷时温度瞬间降低，在低的温度下溶质的扩散作用明显减小，这种激冷作用减少了晶界处的第二相分布，这对于性能的提升有一定的促进作用，第二相分布如图14。水中冷却条件保留了在该温度下的晶粒大小与组织形貌，这是由于在进行冷却初期，镁合金管坯温度很高，在高温作用下管坯内部晶粒会进一步长大；当进行水冷时，由于温度瞬间降低，晶粒长大停止，水中冷却抑制了晶粒的进一步长大，有利于晶粒细化。

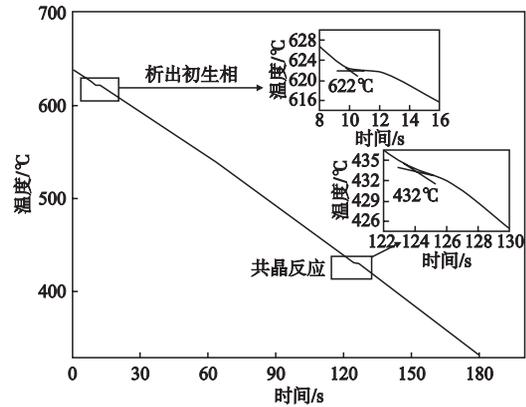
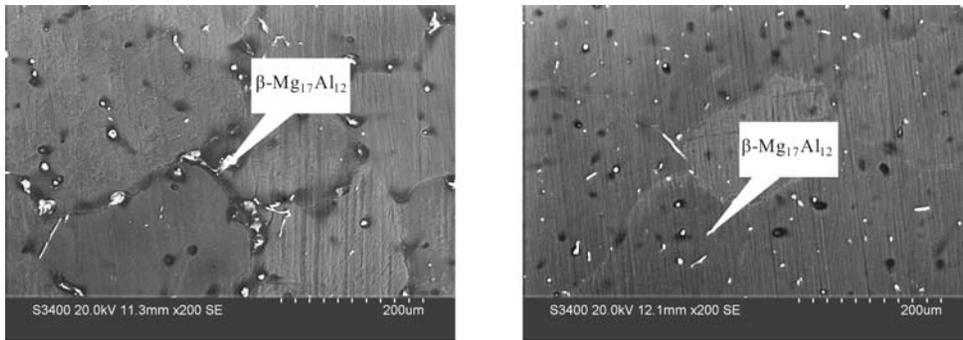


图13 温度变化图

Fig. 13 Temperature change diagram



(a) 空气冷却

(b) 水冷却

图14 不同冷却条件第二相分布

Fig. 14 Second phase distribution under different cooling conditions

3 结论

(1) 在旋转磁场作用下，液态镁合金流场由小变大；由于镁合金粘度的增大，流场速度逐渐减小。

(2) 在凝固温度场与变化流场共同作用下，镁合金管坯内部组织性能存在差异，靠近边缘部位的合金性能较差，越靠近中间部位性能越好。所以在进行管坯加工时，可将管坯内外层进行车削处理以保留细晶部分。

(3) 镁合金管坯冷却条件不同也会对其性能产生影响。在搅拌完全水中冷却条件下，保留在该条件下的晶粒大小与组织形貌，使得均匀细小的晶粒占据多数，控制第二相分布，综合性能得以提升。

参考文献:

- [1] 陈振华. 镁合金 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [2] 任兵芝. 电磁搅拌大方坯连铸结晶器内电磁场与流场及温度场耦合过程数值模拟 [D]. 沈阳: 东北大学, 2008.
- [3] 易雪雄. 7xxx铝合金电磁搅拌铸造流场的数值模拟及试验研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- [4] YASUDA H, TOH T, IWAI K, et al. Recent progress of EPM in steelmaking, casting and solidification processing [J]. ISIJ International, 2007, 47 (4): 619-626.
- [5] HANS C. Influence of an electric or magnetic field on the liquid solid transformation in materials and on the microstructure of the solid [J]. Materials Science and Engineering A, 2000, 287 (2): 205-212.
- [6] 韩辉. 电磁搅拌下AZ91镁合金的显微组织与性能研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2008.
- [7] 崔建忠, 乐奇志, 路贵民, 等. 镁合金电磁低温半连续铸造方法: 中国, 031333907 [P]. 2003-12-10.

- [8] 冯小平. 旋转磁场对富铈混合稀土合金化压铸AZ81镁合金组织与性能的影响 [J]. 有色金属, 2008 (2): 47-50.
- [9] 王刘波, 李继高. 旋转磁场对稀土镁合金组织和性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2010, 39 (11): 88-90.
- [10] 许光明, 包卫平, 崔建忠, 等. 不同磁场作用下ZK60镁合金的凝固组织 [J]. 东北大学学报, 2004, 25 (1): 48-50.
- [11] 祖方道, 袁晓光, 梁维中, 等. 铸件成型原理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [12] 霍春影. 旋转磁场对铸造镁合金组织和力学性能的影响 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2017.
- [13] 张宝林, 马幼平, 杨蕾, 等. 冷却条件对AZ31镁合金凝固组织及腐蚀性能的影响 [J]. 有色金属工程, 2016, 6 (3): 26-29.
- [14] 伍平, 王勃, 王晓东. 交变电磁场在晶体生长与凝固方面的应用 [J]. 中国材料进展, 2017, 36 (12): 912-920.
- [15] DU Y, WU Y, PENG L, et al. Formation of lamellar phase with 18R-type LPSO structure in an as-cast Mg 96 Gd 3 Zn 1 (at%) alloy [J]. Materials Letters, 2015, 169 (5): 168-171.
- [16] 王哨兵, 李建超, 付少朋, 等. 连铸圆坯电磁场的数值模拟 [J]. 浙江冶金, 2017 (1): 17-19.

Effect of Temperature Field on Microstructure and Properties of Electromagnetic Stirring Magnesium Alloy

ZHAN Chun, YU Bao-yi, ZHENG Li, YU Bo-ning

(School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870; Liaoning, China)

Abstract:

In this present work, the effect of temperature field on the microstructure and properties of AZ31 magnesium alloys under rotating magnetic field was investigated by means of numerical simulation and experiment. Under the action of rotating magnetic field, the flow velocity of liquid magnesium alloy first increased and then decreased with the decrease of temperature, and the closer to the edge, the smaller the flow velocity becomes. Due to the change of temperature during solidification, the grain size of the billet had the distribution rule of coarse in the edge and fine in the middle along the radial direction, and the mechanical properties of the billet also was low in the edge and high in the middle. The comparison between air cooling and water cooling showed that water cooling was helpful to refine grains and control the distribution of the second phase.

Key words:

electromagnetic stirring; solidification flow field; cooling temperature field; grain refinement; magnesium alloy