

电磁场施加方式对半连续铸造镁合金锭坯组织与性能的影响

张志强, 乐启炽, 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: 采用不同电磁场施加方式和半连续铸造制备 $\phi 200$ mm AZ31 镁合金锭坯。研究电磁场施加方式对 AZ31 锭坯微观组织和力学性能的影响。结果表明, 与常规直接水冷半连续铸锭坯相比, 单感应线圈通电(LFEC)或两组感应线圈同时通电(LFEVC)来铸造锭坯时, 组织细化, 第二相(β - $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$)变得细小弥散, 锭坯横截面边部与中心部位晶粒大小差别明显降低, LFEVC 铸造的锭坯比 LFEC 铸造的更为明显; 两种电磁场施加方式均有利于主合金元素在锭坯中均匀分布, 宏观偏析在很大程度上得到抑制; 两种电磁场施加方式均有利于锭坯的力学性能的提高, 与常规铸造相比, 屈服强度和抗拉强度分别提高 50~60 MPa 和 40~50 MPa, 延伸率也增大 1 倍。

关键词: 镁合金; 电磁场; 微观组织; 力学性能

中图分类号: TG146.2⁺2

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2009)08-1467-05

由于镁合金的密度小, 比刚度和比强度高, 而且具有优良的导热性能、电磁屏蔽性能、阻尼性能、切削加工和减震性能, 同时具有尺寸稳定、无污染、易回收等一系列优点, 因此是结构轻量化的理想材料, 在汽车、航空航天及 3C 产品等工业中有着广阔的商业应用前景^[1,2]。铸造是目前镁合金成型的主要方法, 晶粒细化对提高镁合金的性能起着至关重要的作用^[3,4]。对于绝大多数镁合金来说, 晶体结构为密排六方, 不易发生塑性变形, 组织细化对塑性的影响比其它晶体结构的合金更为显著; 晶粒细化可缩短晶间相固溶时的扩散距离, 大大提高热处理效率; 镁合金具有明显的晶粒粗化倾向, 易产生疏松和热裂等缺陷, 晶粒细化可以避免这些缺陷的产生。因此, 开发晶粒细化技术成为制备高质量镁合金锭坯最为关键的技术。

近年来, 国内外学者对镁合金组织细化进行了大量的研究, 取得了不少的成果。如 20 世纪 70 年代发展起来的半固态金属 (SSM) 新型成型技术^[5]、快速凝固^[6,7]、近液相线铸造法^[8]、细化剂技术^[9]和机械搅拌技术^[10]等等。但是, 特殊的工艺往往会导致成本的提高, 工艺操作上的不便。本实验采用不同电磁场施加方式和半连续铸造制备 AZ31 镁合金锭坯, 并研究其对锭坯组织和性能的影响。

1 实 验

实验所用材料为 AZ31 镁合金, 合金元素为 Mg、Al、Zn、Mn, 其中微量元素 Mn 以 MnCl_2 的形式加入, 化学成分(质量分数, %)为: Al 2.5~3.5; Zn 0.6~1.4; Mn 0.2~1.0; Mg 余量。合金在电阻炉内熔炼, 熔炼时加入微量 Be 进行阻燃, 合金熔炼温度为 700 °C, 合金熔体经除气、扒渣、精炼后降至 680 °C 静置 30 min 后进行半连续铸造, 铸造速度为 100 mm/min。

本实验中, 结晶器由不锈钢加工而成, 内嵌石墨环, 石墨环内径为 200 mm; 两组电磁线圈布置在结晶器外, 线圈由铜管缠绕而成, 互相绝缘, 内通冷却水, 由 BP-30 逆变式电源控制系统控制输出电流及频率。线圈在结晶器周围的布置如图 1 所示。首先, 在半连续铸造 AZ31 镁合金过程中, 只对结晶器下部的 60 匝线圈通频率为 30 Hz、电流为 100 A 的交流电产生交变磁场来铸造(low frequency electromagnetic casting, LFEC); 其次, 在铸造过程中, 对置于结晶器顶部的 80 匝线圈和下部线圈同时分别通以电流为 100 A 的直流电和频率为 30 Hz、电流为 100 A 的交流电产生稳恒磁场和交变磁场来铸造(low frequency electromagnetic vibration casting, LFEVC); 为了比较,

收到初稿日期: 2008-07-27; 收到修改稿日期: 2009-03-11

基金项目: 国家“十一五”支撑计划重点项目(2006BAE04B01-5); 国家自然科学基金(50574028); 国家重点基础研究发展计划(“973”)项目(2007CB613701, 2007CB613702)

作者简介: 张志强, 男, 1978 年生, 博士, 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: 024-83687734, E-mail: zqzhang@mail.neu.edu.cn

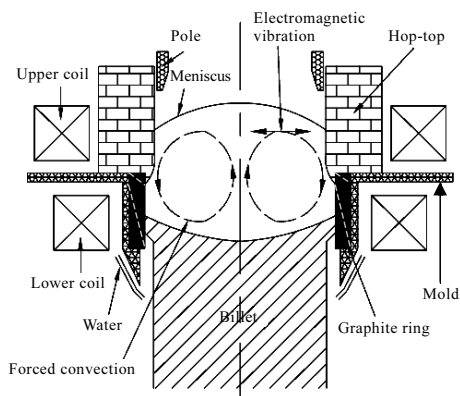


图 1 不同电磁场施加方式及半连续铸造 AZ31 镁合金锭坯示意图

Fig.1 Schematic of semi-continuous casting for the AZ31 billets in different electromagnetic casting conditions

本实验还在两组线圈均不通电的情况下进行了常规直接水冷，铸造了直径为 200 mm 的 AZ31 镁合金锭坯。

在 3 种铸造方法获得的铸锭横截面的边部和中心处取样，试样经水砂纸磨、机械抛光、最后腐蚀进行偏振光观察，并采用化学分析方法测定主合金元素 Al 和 Zn 在铸锭横截面分布情况。同时，对其力学性能进行测定。

2 实验结果

2.1 电磁场施加方式对 AZ31 锭坯显微组织的影响

图 2 为常规 DC 铸造、LFEC 铸造和 LFEVC 铸造 3 种方法铸造的 $\Phi 200$ mm 铸锭横截面边部和中心的显微组织。常规 DC 铸造条件下，由于铸锭的直径较大，中心区域冷却速度较慢，在铸锭中心出现粗大的等轴状枝晶，如图 2b 所示，铸锭中心区域晶粒平均尺寸为 $370\ \mu\text{m}$ ，个别晶粒尺寸达到 $410\ \mu\text{m}$ 。而在铸锭边部组织相对中心变得细小，如图 2a 所示，晶粒平均尺寸为 $290\ \mu\text{m}$ ，铸锭边部和中心部位晶粒尺寸差别较大，这对铸锭后续加工非常不利。图 2c 和 2d 分别为 LFEC 铸造的 AZ31 铸锭边部和中心显微组织。从图中可以看出，LFEC 铸造铸锭边部和中心的显微组织与常规 DC 铸造的相比均得到了显著细化，呈现细小的近等轴枝晶组织，粗大的枝晶被打碎，铸锭边部和中心处的显微组织差别明显减小，边部和中心处晶粒大小分别为 190 和 $230\ \mu\text{m}$ 。采用 LFEVC 铸造的 AZ31 铸锭边部和中心处显微组织如图 2e 和 2f 所示。铸锭边部和中心处的组织与常规 DC 铸造的相比均发生显著细化，边部和中心处的组织差别明显降低。LFEVC 铸造铸锭边部晶粒大小与 LFEC 铸造的相比区别不大，而中心处晶粒大小有所减小，LFEVC 铸造铸锭边部和中

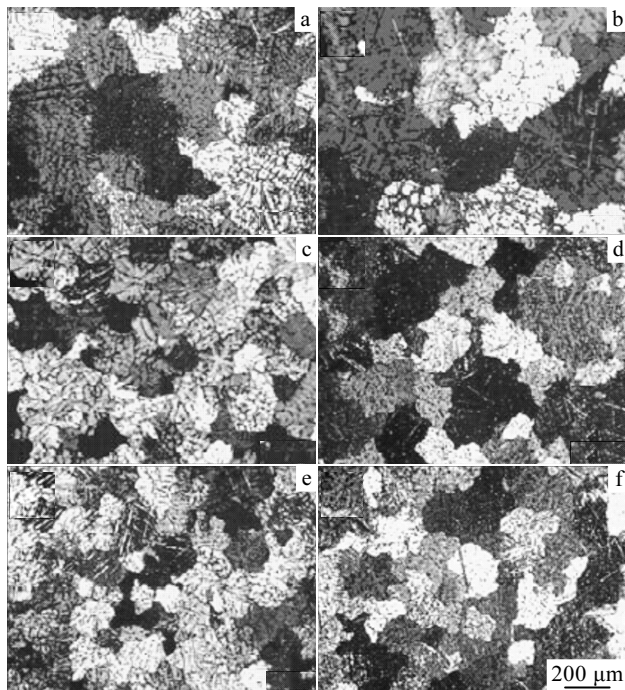


图 2 不同电磁场施加方式下 AZ31 镁合金锭坯的显微组织

Fig.2 Microstructures of AZ31 billets in different electromagnetic casting conditions: (a) conventional DC casting edge, (b) conventional DC casting center, (c) LFEC edge, (d) LFEC center, (e) LFEVC edge, and (f) LFEVC center

心处晶粒尺寸分别为 200 和 $210\ \mu\text{m}$ 。LFEC 和 LFEVC 铸造铸锭横截面 $1/2$ 半径处第二相 ($\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$) 比常规 DC 铸造的更为细小均匀，如图 3 所示。表 1 为不同电磁场施加方式铸造铸锭晶粒大小对比。

2.2 电磁场施加方式对 AZ31 锭坯宏观偏析的影响

根据 Mg-Al 二元合金平衡相图可知，凝固区间较宽，因此 Mg-Al 系合金在铸造过程中合金元素很容易宏观偏析，这种偏析在高压铸造及半连续铸造较大规格铸锭过程中往往更容易出现，且表现得较为明显。图 4a 和 4b 分别为常规 DC、LFEC 和 LFEVC 半连续

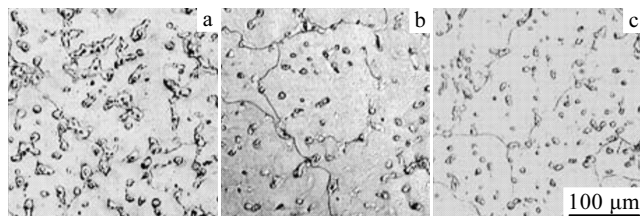


图 3 不同电磁场施加方式下 AZ31 镁合金锭坯中 $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 形貌

Fig.3 Morphologies of $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ in the AZ31 billets in different electromagnetic casting conditions: (a) conventional DC casting, (b) LFEC, and (c) LFEVC

表 1 不同电磁场施加方式制备锭坯平均晶粒尺寸

Table 1 Average grain size of $\Phi 200\text{mm}$ AZ31 billets in different electromagnetic casting conditions (μm)

Method	Edge	Center
DC	290	370
LFEC	190	230
LFEVC	200	210

表 2 不同电磁场施加方式下 AZ31 镁合金锭坯的力学性能

Table 2 Mechanical properties of AZ31 billets in different casting conditions

Method	σ_b/MPa	$\sigma_{0.2}/\text{MPa}$	$\delta/\%$	HV/MPa
DC	190	110	2	410
LFEC	230	160	4	470
LFEVC	236	170	4	490

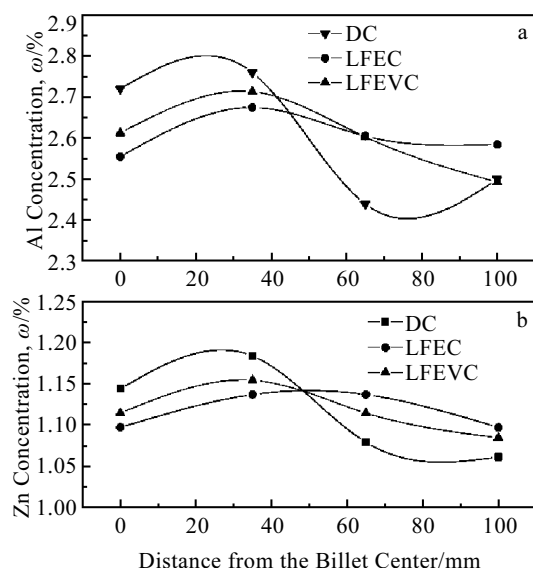


图 4 不同电磁场施加方式下 AZ31 镁合金锭坯中 Al 和 Zn 元素分布

Fig.4 Al (a) and Zn (b) concentration profile of the AZ31 billets in different casting conditions

铸造 $\Phi 200\text{ mm}$ AZ31 镁合金锭坯横截面半径方向上主合金元素 Al 和 Zn 的分布情况。可以看出, 3 种不同铸造技术制备的 AZ31B 镁合金锭坯中主合金元素在横截面上均存在不同程度的偏析。与常规 DC 铸造相比, LFEC 和 LFEVC 大大降低了 AZ31 镁合金横截面上 Al 和 Zn 元素的宏观偏析。常规 DC 铸造时, 铸锭横截面 Al 元素化学成分最大相对差值为 10% 左右, 而 LFEC 铸造时锭坯横截面 Al 元素化学成分相对差值在 3% 左右。Zn 元素分布与 Al 有相类似的分布规律。LFEVC 铸造锭坯横截面 Al 和 Zn 元素分布也比常规 DC 铸造的均匀, 与 LFEC 铸造的相类似。

2.3 电磁场施加方式对 AZ31 锭坯力学性能的影响

用维氏硬度计测量了铸锭 1/2 半径处的宏观硬度, 载荷为 98 N, 测量 6 次, 取平均值。同时, 在铸锭 1/2 半径处沿铸造方向按 ASTM 标准制得拉伸试样, 利用 Instron8032 万能电子拉伸机进行室温拉伸试验, 测量 3 次, 取平均值。表 2 为不同电磁场施加方式下半连续铸造 AZ31 镁合金锭坯硬度和拉伸性能。可以看出,

LFEC 的铸锭硬度与常规铸造的维氏硬度 410 MPa 相比有所提高, 硬度值为 470 MPa, LFEVC 铸造锭坯硬度达到 490 MPa, 比 LFEC 铸造的锭坯略有提高。从表中也可以看出, LFEC 铸造锭坯的屈服强度(160 MPa)和抗拉强度(230 MPa)与常规 DC 铸造的屈服强度(110 MPa)和抗拉强度(190 MPa)相比, 有明显的增加, 分别增加 50 MPa 和 40 MPa。LFEC 铸造锭坯的延伸率达到 4%, 比常规 DC 铸造的 2% 增大了 1 倍。LFEVC 铸造锭坯的屈服强度、抗拉强度和延伸率分别为 170, 236 MPa 和 4%, 与常规 DC 铸造的相比有明显的提高, 而与 LFEC 铸造的相比略有增加。这是由于 LFEC 和 LFEVC 铸造锭坯组织比常规 DC 铸造的变得细小均匀的缘故, 即细晶强化作用的结果。

3 分析与讨论

在半连续铸造过程中, 只对结晶器下部感应线圈通交流电后会在结晶器熔体内激发变化的磁场 B , 产生感生电流 $J=1/\mu(\nabla \times B)$ 。感生电流和变化的磁场交互作用使合金熔体受到 Lorentz 力 $F=J \times B$ 的作用, F 为体积力。熔体内部各点受到的 Lorentz 力由下式给出^[11]:

$$F = [1/\mu(\nabla \times B)] \times B = 1/\mu(B \cdot \nabla)B - \nabla(1/2\mu B^2)$$

式中, B 为磁感应强度, μ 为合金熔体的磁导率。方程右边的第 1 项是回旋驱动力, 引起结晶器内金属液流动形成强制对流。第 2 项是垂直于金属液侧面的力, 它与表面张力、静压力平衡, 对金属熔体产生约束作用, 熔体表面形成弯液面, 减少与结晶器接触高度(软接触), 从而减小一次冷却, 使初生凝固壳位置下降, 主要用以改变铸锭的表面质量。对结晶器下部线圈通交流电铸造时, 熔体在回旋驱动力的作用下处于强烈的混合对流运动状态, 使结晶器壁和液面处温度较低的熔体流入溶液内部, 并与内部温度高的熔体混合, 加快了内部熔体温度的降低。整个熔体内温度场相对均匀, 这样缩短了结晶器内熔体同时进入过冷状态的时间, 有利于熔体内部各处均匀大量地形成晶核, 消除局部过热造成的部分晶粒的重熔, 增加熔体有效晶核数目。电磁场以电磁波形式作用于熔体, 加大熔体内部存在的结构起伏和能量起伏, 而原子与原子之间团聚体的体积增加, 可能降低临界形核功, 从而有利

于大量晶核的形成。当熔体形核数目足够多时,晶粒在未达到枝晶生长阶段就已互相接触,形成细小、均匀和呈球形的微观组织。并且,就晶粒的长大阶段而言,LFEC 铸造溶质场和温度场比较均匀,晶粒更易呈球形长大。另外,与常规 DC 铸造相比,LFEC 铸造时结晶器中熔体与结晶器相接触的地方由于散热快而先形成的晶粒受到流动液体的影响,脱落下来进入流动的液体中,既可以消除沿结晶器壁方向择优生长形成柱状晶,还可能在熔体中成为新的形核点。同时,由于镁合金热传导能力强,在凝固前沿的固-液相区内大量的热向已凝固的金属方向散失,液穴平坦,大量的晶粒从两相区“沉积”到固相面上,一层层地积累凝固,同样可以消除沿固相择优生长的柱状晶。因此,对结晶器下部的感应线圈通交流电来铸造 AZ31 镁合金锭坯时,锭坯晶粒与常规 DC 铸造的相比明显细化,同时, β -Mg₁₇Al₁₂ 相变得细小弥散,宏观偏析明显减低,力学性能也有很大提高。

在半连续铸造镁合金过程中,对置于结晶器顶部和下部的感应线圈同时分别通直流电和交流电后会在结晶器熔体内产生稳恒磁场 B_0 的同时,还产生交变磁场 B ,交变磁场在熔体内部又诱发形成相同频率的感应电流 J ,三者之间交互作用在熔体中产生电磁振荡力,并通过熔体传遍整个金属熔体,电磁振荡产生原理如图 5 所示^[12]。

对结晶器顶部和下部两组线圈同时通电时,除了对熔体产生与单独对下部线圈通电时相同的强烈混合对流运动外,还产生一个沿径向方向不断拉伸和压缩的振荡力作用。其中两组线圈产生的强烈混合对流对结晶器中熔体作用机制与单一下部线圈作用的基本一致,即具有均匀温度场、促进熔体内部各处均匀大量形核、降低临界形核功,增加熔体有效晶核数目和弥散合金元素等作用。两组线圈产生的振荡力也具有与

强烈混合对流对熔体作用同样的作用,同时电磁振荡力的反复拉伸与压缩作用,增加了熔体对高温固相化合物及准固相原子团簇的润湿,降低了以它们为基底的异质形核临界自由能,在高的过冷度下,大量晶核依附其上,异质形核瞬间而生。因此在半连续铸造过程中,两组线圈同时作用产生的电磁振荡力与搅拌作用形成的强制对流,使熔体产生相当大的扰动,起着弥散合金元素、均匀温度场、加大熔体整体过冷度、增加并弥散形核核心、抑制枝晶生长的作用。这样采用两组线圈同时通电铸造的 AZ31 镁合金锭坯组织与性能比常规 DC 铸造的明显改善,比单一线圈作用的也略有提高。在半连续铸造过程中,单一线圈通电参数和两组线圈同时通电参数对 AZ31 镁合金锭坯组织和性能的影响也正在研究。

4 结 论

1) 与常规铸造(DC)的 $\Phi 200$ mm AZ31 镁合金锭坯相比,对结晶器下部感应线圈通电进行电磁铸造时获得的锭坯组织显著细化,边部和中心部位晶粒大小差别明显降低。而对结晶器上下两组线圈同时分别通电进行电磁振荡铸造时铸锭中心与边部组织差别进一步降低。

2) 两种电磁场施加方式均有利于合金元素在锭坯横截面均匀分布,宏观偏析得到抑制,同时, β -Mg₁₇Al₁₂ 相也变得细小均匀。

3) 两种电磁场施加方式均有利于锭坯力学性能的提高。锭坯屈服强度和抗拉强度比常规铸造(DC)分别增加 50~60 MPa 和 40~50 MPa,延伸率也增大了 1 倍。

参考文献 References

- [1] Mordike B L, Ebert T. *Mate Sci and Eng*[J], 2001, A302: 37
- [2] Kojima Y. *Mater Trans*[J], 2001, 42: 1154
- [3] Aghion E, Bronfin B. *Mater Sci Forum*[J], 2000, 350~351(1): 19
- [4] Eliezer D, Aghion E, Fores F H. *Adv Perfor Mater*[J], 1998, 5: 201
- [5] Flemings M C. *Metall Trans*[J], 1991, 22B(6): 269
- [6] Polmear I J. *Mater Sci Technol*[J], 1994, 10: 1
- [7] Maeng D Y, Kim T S, Lee J H. *Scripta Mater*[J], 2000, 43(5): 385
- [8] Le Q C, Ou P, Wu Y D. *Acta Metall Sin*[J], 2002, 38(2): 219
- [9] Lee Y C, Dahle A K, Stjohn D H. *Metall Mater Trans A*[J], 2000, 31: 2895
- [10] Li D N, Luo J R, Wu S S. *J Mater Process Technol*[J], 2002, 129: 431

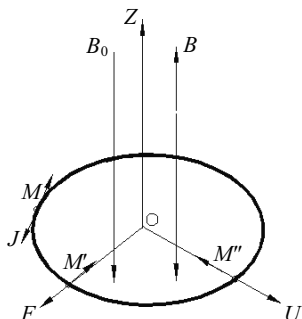


图 5 低频电磁振荡产生原理

Fig.5 Principle of low frequency electromagnetic vibration

M, M', M'' ——Mutual inductance;

U ——Magnetic potential difference

[11] Vives C. *Metall Trans B*[J], 1989, 20: 623

[12] Vives C. *Mater Sci Eng A*[J], 1993, 173: 169

Effect of Different Electromagnetic Field Application Ways on Microstructures and Mechanical Properties of Semi-Continuous Cast Magnesium Alloy Billets

Zhang Zhiqiang, Le Qichi, Cui Jianzhong

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

Abstract: Using different electromagnetic fields application ways, AZ31 magnesium alloy was semi-continuously cast into billets with diameter of 200 mm. The effects of the different electromagnetic fields application ways on the microstructures and mechanical properties of AZ31 billets were investigated. The results show that compared with the conventional direct-chill semi-continuous cast billets, the microstructures in the entire cross section of the AZ31 billets cast in the single alternating magnetic field or the combination of alternating magnetic field and stationary magnetic field are significantly refined, the β -Mg₁₇Al₁₂ phases become fine and dispersive, the difference of the grain size between the border and center of the billet is reduced, and the difference of the microstructures in the billet cast in the combination of alternating magnetic field and stationary magnetic field is smaller than that of the single alternating magnetic field casting. The two electromagnetic field application ways are all beneficial to the homogeneous distributing of the alloy main elements in the cast billets, to great suppressing of macro-segregation and to improving of the mechanical properties of the billets. Compared with the properties of the conventional cast billets, the yield strength and the ultimate tensile strength of the billet cast in the electromagnetic field are increased by 50~60 MPa and 40~50 MPa, respectively, and the elongation is doubled.

Key words: magnesium alloy; electromagnetic field; microstructure; mechanical properties

Biography: Zhang Zhiqiang, Ph. D., The Key Laboratory of Electromagnetic Processing of Materials, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110004, P. R. China, Tel: 0086-24-83687734, E-mail: zqzhang@mail.neu.edu.cn