

复合物理场对 AZ61 镁合金半连续铸造凝固组织的影响

张志强, 王占坤, 尹思奇, 宝磊, 陈保龙, 乐启焱, 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 110819)

摘要: 采取不同外场施加方式进行半连续铸造以制备 $\Phi 165$ mm AZ61 镁合金锭坯, 研究不同外场施加方式对 AZ61 镁合金锭坯晶粒尺寸和硬度的影响。结果表明, 施加频率为 30 Hz、电流为 60 A 的交变电磁场后, 铸锭边部和中心平均晶粒尺寸由常规半连续铸造(DC)的 248 和 276 μm 分别降至 196 和 259 μm , 降低幅度分别达 21%和 6.2%, 边部和中心晶粒细化程度明显不同; 而施加超声-低频电磁复合场时, 铸锭边部和中心平均晶粒尺寸分别降至 185 和 208 μm , 降低幅度分别达 25.4%和 24.6%, 中心区域晶粒细化程度大幅度提高。另外, 与常规 DC 铸造相比, 复合场铸造使合金铸锭的硬度提高且从铸锭边部到中心硬度差别明显减小。可见, 超声场-低频电磁复合场半连续铸造显著改善了 AZ61 镁合金锭坯的内部质量, 使凝固组织更加均匀、细小, 硬度提高并分布均匀。

关键词: 镁合金; 电磁场; 超声-电磁复合场; 晶粒细化; 硬度

中图分类号: TG146.2⁺2

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2016)09-2385-06

镁合金具有密度小、比强度和比刚度高, 导热性、电磁屏蔽性能、阻尼性能优良, 尺寸稳定和成本低等一系列优点, 在汽车工业、电子通讯工业和航空航天等领域拥有日益广泛的应用^[1-3]。目前, 铸造是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^[4,5]。而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。因此, 开发晶粒细化工艺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^[6]、快速凝固^[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。

最近, 对在金属凝固过程中施加超声波振动来改善凝固组织、净化熔体从而提高力学性能的技术应用比较多^[11-13]。因为高能超声波具有独特的声学效果, 在金属凝固过程中, 如果施加适当时间的超声波振动, 铸锭的凝固组织就会从粗大的柱状晶变成均匀细小的等轴晶, 同时铸锭的宏观及微观偏析也得到了改善; 与超

声场相比, 低频电磁场 (low-frequency electromagnetic casting, LFEC) 也是一种常用的细化晶粒手段, 可实现铸锭凝固微观组织细小均匀, 提高晶内合金元素含量, 增强铸锭的抗裂纹能力, 减小宏观偏析等^[14-16]。

但是, 从 2 种外场处理方法比较来看, 都有各自的局限性, 将其组合起来处理镁合金熔体的报道并不多见。因此, 本实验以 AZ61 镁合金为研究对象, 研究超声-低频电磁复合场对半连续铸造凝固组织的影响。

1 实验

实验所用材料为 AZ61 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: 5.79Al; 1.087Zn; 0.014Mn; 余量 Mg。将合金放入电阻炉内进行熔炼, 熔炼温度为 680 $^{\circ}\text{C}$, 经保温、静置、过滤后进行半连续铸造。

镁合金超声-电磁复合场铸造设备由加热炉、超声波发生器、感应线圈、结晶器 (内径为 165 mm)、油滑装置及气体保护装置等部分组成。感应线圈中的交变电流由变频电源提供。设备简化图如图 1 所示。当熔体温度降至 664 $^{\circ}\text{C}$ 时开始进行半连续铸造, 开始铸造时, 速度控制在 60 mm/min, 冷却水量为 25 L/min,

收稿日期: 2015-09-22

基金项目: 国家重点基础研究发展规划 (“973” 计划) (2013CB632203); 辽宁省自然科学基金 (2014028027)

作者简介: 张志强, 男, 1978年生, 博士, 副教授, 东北大学材料电磁过程研究教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110819, 电话: 024-83689825, E-mail: zqzhang@mail.neu.edu.cn

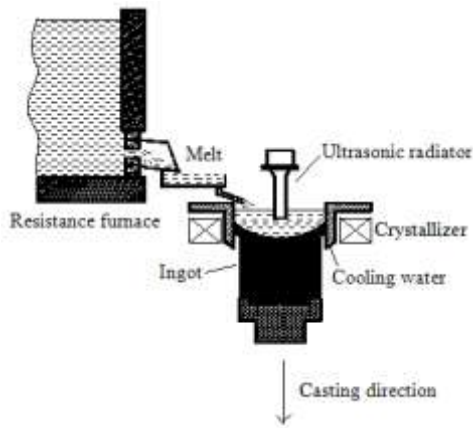


图 1 AZ61 镁合金超声-电磁复合场处理装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of semi-continuous casting of AZ61 magnesium alloy billet under ultrasonic vibration-LFEC complex field

然后逐步提高铸造速度一直到 80 mm/min，待速度稳定后开始施加电磁场，施加电流为 $I=60\text{ A}$ ， $f=30\text{ Hz}$ ；当铸锭长度为 120 mm 时，在施加电磁场同时施加超声场，超声功率为 800 W；当铸锭长度为 1200 mm 时分别停止施加超声场和电磁场，最后得到的铸锭长度为 1539 mm。

在凝固后的铸锭横截面的边部、 $R/2$ 和中心处取样，试样经水砂纸研磨、机械抛光、最后腐蚀进行组织观察。

使用 450SVD™ 维氏硬度计测试铸锭的硬度。载荷为 29.4 N；加载时间为 15 s，从中心到边部选取 8 个点，第 1 个点距中心 5 mm，其余的每隔 10 mm 选取 1 个点，每个点处的硬度测量方法为从上到下随机测 5~6 个点，计算平均值并将其作为最终测定结果。

2 结果与分析

2.1 低频电磁场 (LFEC) 处理对 AZ61 镁合金凝固组织的影响

图 2 是施加频率为 30 Hz，电流为 60 A 的电磁场前后 AZ61 镁合金铸锭显微组织的变化情况。可以看出，未施加电磁场的晶粒组织粗大且不均匀，施加电磁场后铸锭的不同部位晶粒均有不同程度的细化。

为了更好地对比低频电磁场对 AZ61 镁合金晶粒尺寸的影响，利用截线法计算晶粒尺寸。图 3 给出了施加电磁场前后晶粒尺寸的变化情况。可以看出，未经电磁场处理时铸锭边部、 $R/2$ 及中心部位的晶粒尺寸分别为 248、261 和 276 μm 。这是由于金属熔体浇注到结晶器时，由于铸锭尺寸较大 ($\Phi 165\text{ mm}$)，铸锭边部由于过冷度较大首先凝固，铸锭中心最后凝固，所以铸锭边部凝固组织比较细小， $R/2$ 其次，铸锭中心部位凝固组织比较粗大；而经过电磁场处理后，对应部位晶粒尺寸变为 196、214 和 259 μm ，平均晶粒尺寸从 262 μm 减小到 223 μm 。说明电磁场对晶粒有一定程度的细化作用，但边部和中心部位晶粒尺寸差别较大。

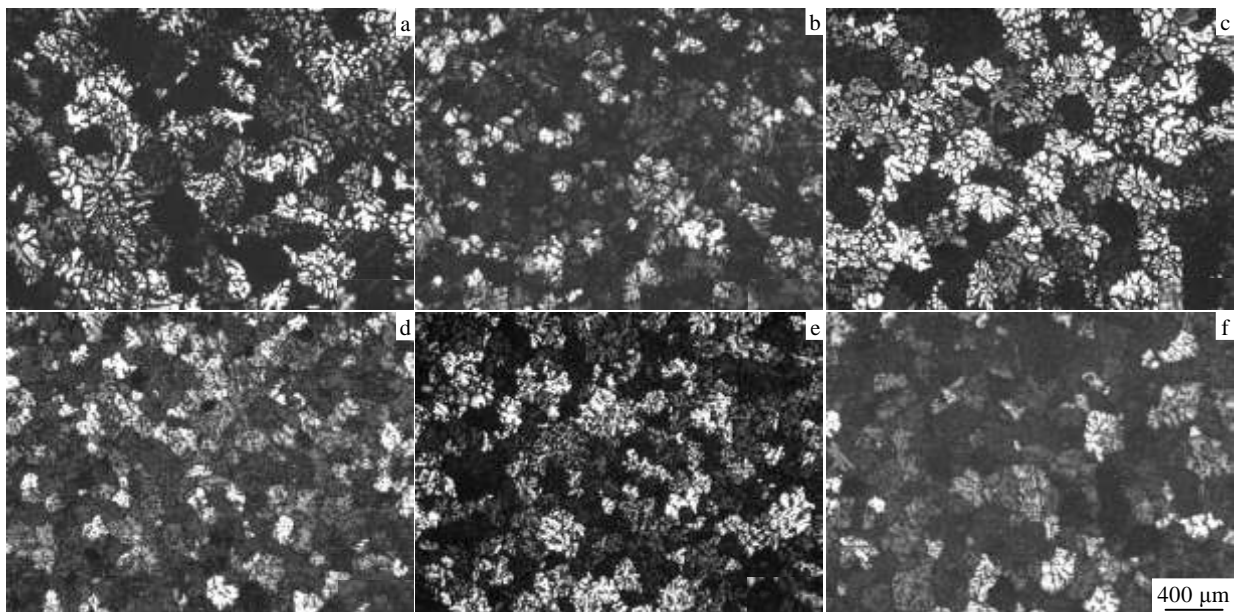


图 2 低频电磁场对 AZ61 镁合金显微组织的影响

Fig.2 Effect of LFEC on microstructures of AZ61 magnesium alloy: (a) conventional DC casting edge, (b) LFEC edge, (c) conventional DC casting $R/2$, (d) LFEC $R/2$, (e) conventional DC casting centre, and (f) LFEC centre

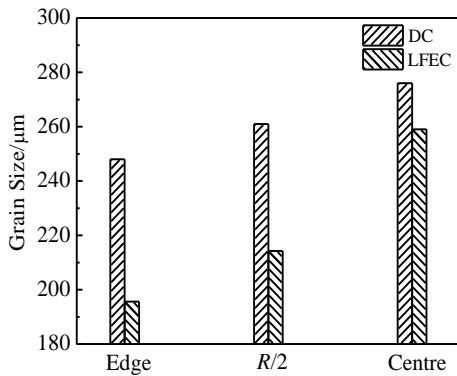


图3 低频电磁场对AZ61镁合金晶粒尺寸的影响

Fig.3 Effect of LFEC on grain size of AZ61 magnesium alloy

半连续铸造时在结晶器周围施加低频交变电磁场,这样高温金属熔体进入结晶器后,只有极少量的熔体继续向下运动,大部分高温熔体在电磁场的作用下发生强制偏转,横向流动到结晶器边部,碰到结晶器壁后向下运动,通过液穴底部回流到熔体中心,形成连续、循环的涡流运动。因此在施加磁场后熔体内部在强制对流的作用下,边部靠近结晶器壁处的低温熔体被带向熔体中心,使该区域熔体被部分冷却;反过来,熔体中心的高温熔体被迅速带向边部,接近结晶器壁时快速冷却。这样,在强制对流的作用下,和常规铸造时相比,熔体内部径向换热大大加强,熔体本身和外界的热交换效率迅速增加。因此,在交变磁场作用下,熔体内部的温度场分布更加均匀,中心到边部的温度梯度会更小。均匀的温度场对游离晶核的存活和生长非常有利,由于结晶器壁的一次冷却作用,在器壁区域会优先形成大量的晶核。在强制对流的作用下,熔体内部的紊流对晶核的剪切力大于晶核和结晶器壁的粘着力,晶核被带向熔体内部及中心。由于整个结晶器内熔体的温度低于液相线温度,且温度分布较均匀,晶核迅速生长超过晶核临界尺寸,加之熔体内部的强制对流不断地将结晶器壁处形成的晶核带向熔体中心,因此,低频电磁铸造过程中整个熔体内部的形核率大大增加,从而抑制了粗大枝晶的形成和生长,铸锭的边部和中心部位晶粒比常规铸造的细小均匀。但在相同电磁条件下,铸锭中心晶粒仍比边部晶粒粗大。这是由于在低频电磁半连续铸造镁合金过程中,随结晶器内镁合金熔体温度降低,在熔体内有固相晶核析出,而对于金属镁来说,固相导电率大于液相,这样相对于液相,固相颗粒中的感生电流密度要大于周围液相中的电流密度,由于电磁场的“集肤”效应,感生电流会主要集中在固相颗粒表面。同时由

于电磁场空间分布的不均匀性,熔体内不同位置处磁场不同,因此不同位置处生成固相的感生电流大小不同。但在同一时刻,整个熔体内各点磁场随时间变化的磁场方向是一致的,即在同一时刻,熔体内各个固相颗粒内产生的感生涡电流的回旋方向一样,这样熔体内的固相颗粒在凝固的过程中会受到彼此的排斥力作用。靠近结晶器边部熔体温度较低,是固相形成和生长的有利区域。而由于电磁场的“集肤”效应,该区域恰恰是磁场强度最大,感生电流分布最强的区域。因此,在铸锭的凝固过程中,处在熔体“集肤”区域内的大量晶核在交变电磁场的作用下受到彼此排斥力的作用,在该区域固相粒子有弥散分布的趋势,所以低频电磁半连续铸造的镁合金锭坯边部和中心晶粒大小仍然有区别,中心较边部晶粒尺寸粗大很多。

2.2 超声场(UST)对AZ61镁合金显微组织的影响

为了观察超声场对AZ61镁合金显微组织的影响,本实验在施加电磁场的基础上继续施加功率为800W的超声场,然后比较施加超声场前后AZ61镁合金的凝固组织,如图4所示。可见施加超声场后铸锭的凝固组织也有一定程度的细化,但其细化程度与低频电磁场有所区别。

为了更清晰地描述晶粒尺寸的变化情况,图5给出了施加超声场前后晶粒尺寸的变化。可以看出,在继续施加超声场后,整个铸锭的晶粒又得到进一步的细化。与施加电磁场不同的是,施加超声场后细化最明显的是锭坯的心部,晶粒尺寸由259μm减小到208μm,R/2处与边部的细化程度则比较轻,同时,锭坯中的粗大晶粒已经消失,而且晶粒分布更加均匀,平均晶粒尺寸由235μm减小到200μm。

当高强超声浸入到熔融金属熔体中时,有声空化效应和声流效应这两个现象发生,这两个效应均对凝固行为有重大的影响^[17,18]。在空化区域,空化泡膨胀崩塌后产生大量细小的空化泡并产生强大的冲击波,这使得在凝固期间产生的初生晶核被破碎并均匀地分布在熔体中。超声除了能破碎初生晶核外,也对形核率有重大影响。超声空化能激活熔体中初生晶核,并使其转变为形核质点。空化泡长大将从空化泡周围熔体吸收能量,这样导致在空化泡表面产生过冷,在这一区域有利于大量晶核形成;在声流的作用下,形成的大量晶核能够被均匀地分布在整个熔体中。而且熔体中大量空化泡的崩塌将导致局部区域瞬时的高温、高压和强烈的冲击波,这些作用能够打碎二次枝晶,使得晶核大量增值。超声处理也使得熔体中温度分布更加均匀,能够实现熔体同时凝固。所以合金在超声作用下凝固时,晶粒更加细化、组织更加均匀。但在

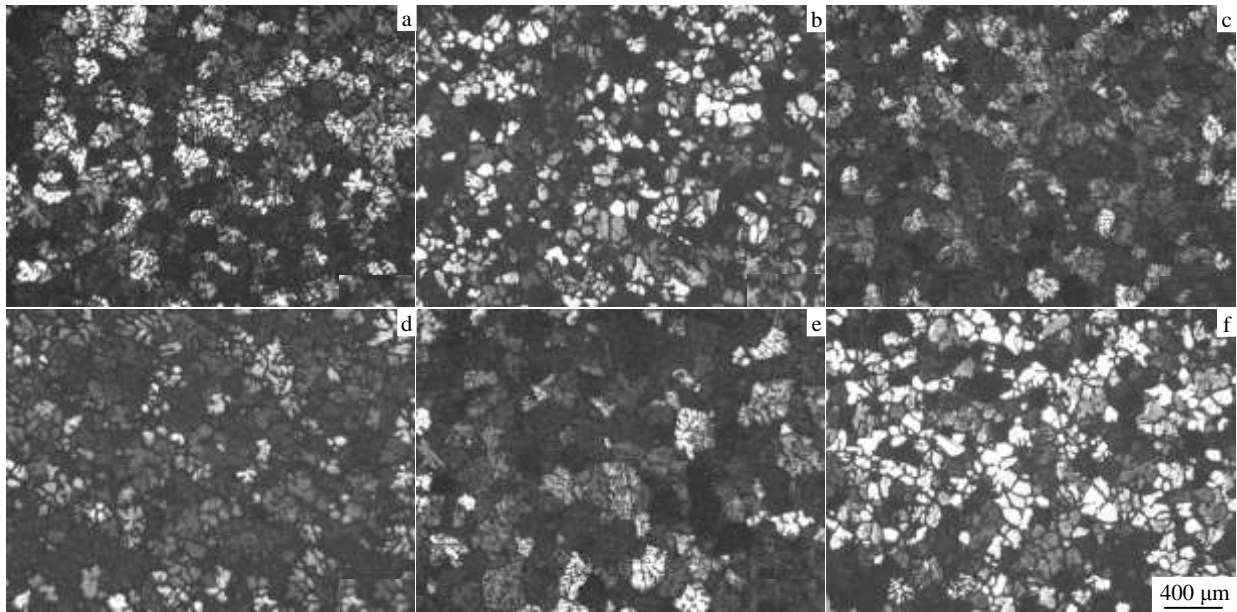


图 4 超声场对 AZ61 镁合金显微组织的影响

Fig.4 Effect of UST on microstructures of AZ61 magnesium alloy: (a) LFEC edge, (b) (LFEC+UST) edge, (c) LFEC R/2, (d) (LFEC+UST)R/2, (e) LFEC centre, and (f) (LFEC+UST) centre

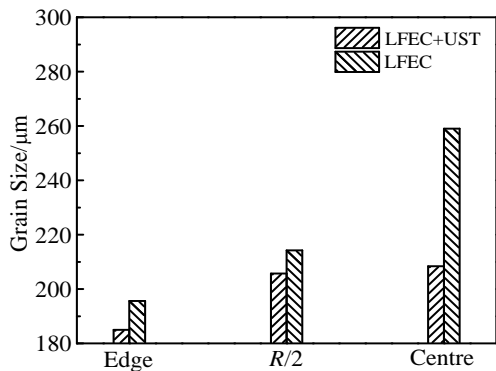


图 5 超声场对 AZ61 镁合金晶粒尺寸的影响

Fig.5 Effect of UST on grain size of AZ61 magnesium alloy

本实验中，铸锭较大(Φ165 mm)，且将超声探头浸入熔体中间位置，因此超声空化效应所产生的区域主要集中在铸锭的中心部位，并且声流的搅拌作用范围也很有限。所以，由于超声的衰减作用导致 R/2 和铸锭边部组织细化效果一般，而中心部位组织最为细小。这表明超声场的影响主要集中于超声杆周围区域，还不能对铸锭边部产生显著影响。

2.3 复合场 (LFEC+UST) 对 AZ61 镁合金显微组织的影响

将常规 DC 铸造与复合场处理 AZ61 镁合金组织进行对比并对晶粒尺寸进行计算，如图 6 和图 7 所示。可

以看出，无外场处理的 AZ61 镁合金晶粒粗大，而且分布不均匀，边部和中心晶粒尺寸差距较大，而超声-电磁复合铸造的 AZ61 镁合金的晶粒得到明显细化，锭坯平均晶粒尺寸由 262 μm 减小到 200 μm，而且分布很均匀，中心的细化最为显著。复合场可使锭坯整体晶粒尺寸差别减小。

由此可知，(UST+LFEC)复合场铸造后 AZ61 镁合金内部组织得到了明显的改善，它综合了单一磁场和单一超声场的优势。前面讨论过，由于电磁场“集肤效应”使得晶粒细化主要集中在铸锭的表面部位；而由于超声场的聚集作用，距离超声杆越远，细化效果则越差。因此，超声场弥补了电磁场的“集肤效应”，而电磁场的集肤效应弥补了超声的“聚集作用”，二者取长补短共同作用，显著改善了锭坯的内部质量，使凝固组织更加均匀、细小，并且整体晶粒尺寸相差不大。

2.4 不同外场对 AZ61 镁合金铸态组织硬度的影响

图 8 为不同外场对 AZ61 镁合金硬度的影响。无外场条件下，由于锭坯整体均为粗大疏松的晶粒组织，所以锭坯整体硬度偏小；而施加电磁场后由于电磁场的“集肤效应”，使边部晶粒细化显著，故铸锭边部硬度略有提高，但锭坯 R/2 处硬度却有所下降，这是因为铸锭中心细化效果不好，且铝元素在此处偏析严重，共晶组织增加，故硬度有所减小；在超声-电磁复合场作用下，锭坯的整体硬度都有所增加，虽然增加幅度不大，但是锭坯整体的硬度分布变得更为均匀。

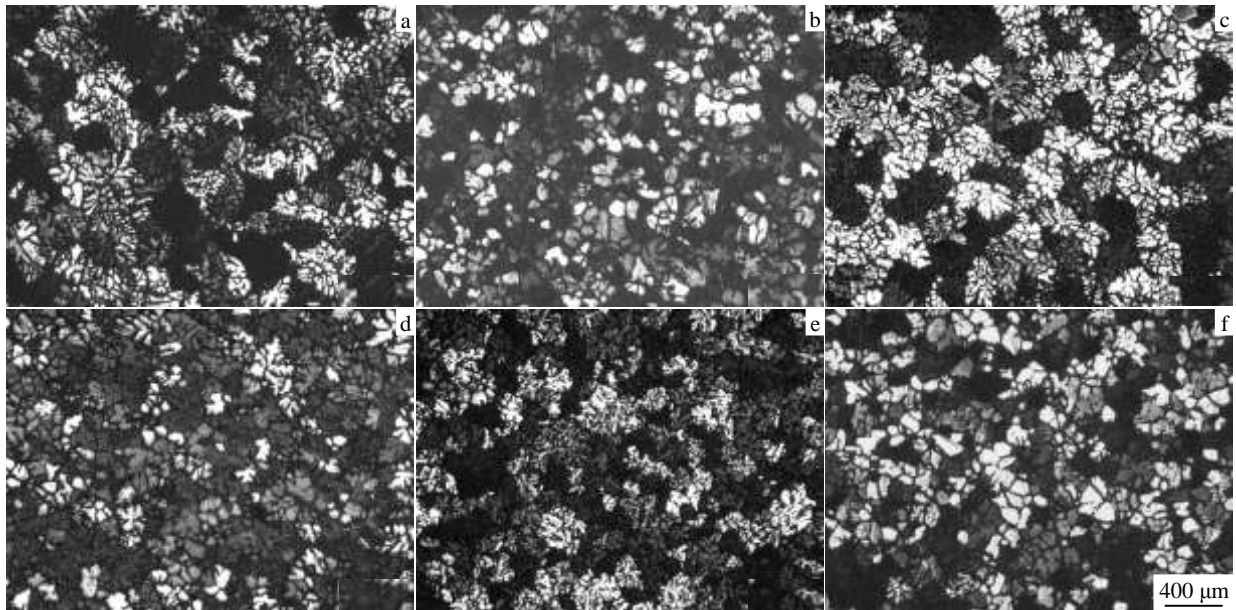


图 6 复合场对 AZ61 镁合金显微组织的影响

Fig.6 Effect of (UST+LFEC) on microstructures of AZ61 magnesium alloy: (a) conventional DC casting edge, (b) (UST+LFEC) edge, (c) conventional DC casting R/2, (d) (UST+LFEC) R/2, (e) conventional DC casting centre, and (f) (UST+LFEC) centre

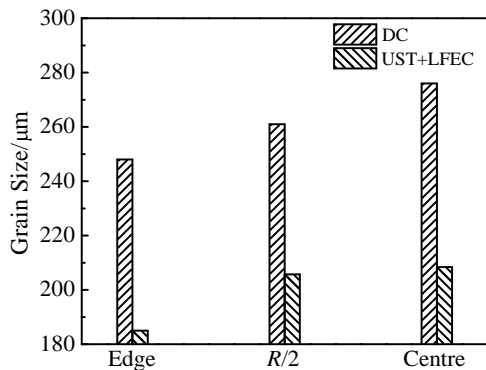


图 7 复合场对 AZ61 镁合金晶粒尺寸的影响

Fig.7 Effect of (UST+LFEC) on grain size of AZ61 magnesium alloy

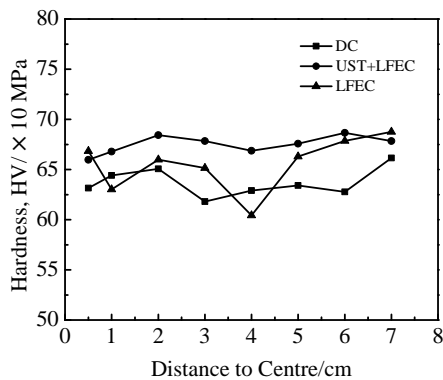


图 8 不同外场对 AZ61 镁合金硬度的影响

Fig.8 Effect of different fields on hardness of AZ61 magnesium alloy

3 结 论

1) 对于 AZ61 镁合金，施加频率为 30 Hz、电流为 60 A 的交变电磁场后，铸锭边部和中心平均晶粒尺寸分别由常规 DC 铸造的 248 和 276 μm 降至 196 和 259 μm，降低幅度分别达 21% 和 6.2%，边部和中心的晶粒细化程度差别较大。

2) 在半连续铸造过程中施加超声-低频电磁复合场时，铸锭中心部位的组织进一步得到明显细化，且不同部位组织趋于均匀；铸锭边部和中心平均晶粒尺寸分别由常规 DC 铸造的 248 和 276 μm 降至 185 和 208 μm，降低幅度分别达 25.4% 和 24.6%，复合场使铸锭整个横截面组织变得更为均匀、细小。

3) 超声场弥补了电磁场的“集肤效应”，而电磁场的集肤效应弥补了超声的“聚集作用”，其复合场“取长补短”共同作用，显著改善了锭坯的内部质量，使凝固组织更加均匀、细小。另外，与 DC 铸造相比，超声-低频电磁复合场使 AZ61 镁合金铸锭的硬度有所增加，虽然增加幅度不大，但是锭坯整体的硬度分布变得更为均匀。

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] Friedrich H, Schumann S. *J Mater Proc Technol*[J], 2001, 117(3):

- 276
- [4] Zhang Zhiqiang(张志强), Le Qichi(乐启炽), Cui Jianzhong(崔建忠). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2009, 38(8): 1467
- [5] Aghion E, Bronfin B. *Mater Sci Forum*[J], 2000, 350~351(1): 19
- [6] Flemings M C. *Metall Trans*[J], 1991, 22B(6): 269
- [7] Polmear I J. *Mater Sci Technol*[J], 1994, 10: 1
- [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
- [11] Xu H, Jian X, Meek T T *et al. Materials Letters*[J], 2004, 58: 3669
- [12] Naji Meidani A R, Hasan M. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2004, 147: 311
- [13] Jun W L, Momono T, Yoshinori T *et al. Materials Letters*[J], 2008, 62: 4152
- [14] Zhang Zhiqiang(张志强). *Thesis for Doctorate*(博士学位)[D], Shenyang: Northeastern University, 2008
- [15] Mizutani Y, Tamura T, Miwa K. *Materials Science and Engineering A*[J], 2005, 413-414: 205
- [16] Alireza R, Kenji M. *Metallurgical Transactions A*[J], 2000, 31A: 755
- [17] Zhang Zhiqiang(张志强), Le Qichi(乐启炽), Cui Jianzhong(崔建忠). *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2008, 37(1): 173
- [18] Jia Zheng(贾征), Zhang Zhiqiang(张志强), Le Qichi(乐启炽) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2011, 40(10): 1780

Effect of Compound Physical Field on Microstructures of Semi-Continuous Cast AZ61 Magnesium Alloy Billets

Zhang Zhiqiang, Wang Zhankun, Yin Siqi, Bao Lei, Chen Baolong, Le Qichi, Cui Jianzhong

(The Key Laboratory of Electromagnetic Processing of Materials, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: AZ61 magnesium alloy was semi-continuously cast into billets with 165 mm in diameter by different external field application ways. The effects of different external field application ways on the grain size and hardness of AZ61 billets were investigated. The results show that compared with the conventional direct-chill semi-continuous cast billets, the grain size of the AZ61 billets cast declines from 248 μm in the edge and 276 μm in the centre to 196 μm and 259 μm , respectively (with a reduction of 21% and 6.2%, respectively) by low-frequency electromagnetic field ($f=30$ Hz, $I=60$ A). The structure refining effects in edge and centre are significantly diverse. However, the grain size in the edge and centre reduces from 248 μm in the edge and 276 μm in the centre to 185 μm and 208 μm , respectively (with a reduction of 25.4% and 24.6%, respectively) by combining ultrasonic and LFEC, and the structure refining effects in centre are significantly improved. Moreover, compared with the conventional DC casting, the compound physical field can improve the hardness of the ingot and obviously reduce the difference of hardness from edge to centre. Therefore, the compound physical field greatly improves the inner qualities of AZ61 magnesium alloy ingot billet, and the microstructure is markedly refined, so the hardness of ingots is uniformly improved.

Key words: magnesium alloy; electromagnetic field; ultrasonic-electromagnetic compound field; grain refinement; hardness

Corresponding author: Zhang Zhiqiang, Ph. D., Associate Professor, The Key Laboratory of Electromagnetic Processing of Materials, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110819, P. R. China, Tel: 0086-24-83689825, E-mail: zqzhang@mail.neu.edu.cn