

电磁场频率对半连续铸造 Al-Zn-Mg-Cu 合金组织与性能的影响

王睿^{1, 2}, 张浩宇¹, 王顺成³, 吴锡坤³

(1. 沈阳工业大学材料科学与工程学院, 辽宁沈阳 110870; 2. 广东省材料与加工研究所, 广东广州 510651;

3. 广东兴发铝业有限公司, 广东佛山 528137)

摘要: 采用低频电磁场半连续铸造技术制备直径200 mm的Al-Zn-Mg-Cu合金圆棒, 利用光学显微镜、扫描电子显微镜(含EDS)和拉伸试验机, 研究了电磁场频率对Al-Zn-Mg-Cu合金圆棒显微组织与力学性能的影响。结果表明: 随着电磁场频率的逐渐增加, 圆棒横截面的 α -Al晶粒逐渐从枝晶转变为等轴晶, 晶粒尺寸减小, Zn合金元素的偏析程度减小, 晶间MgZn₂相和Al₃Fe相的尺寸逐渐细化, 合金圆棒的拉伸力学性能提高。当电磁场频率增加到45 Hz时, 圆棒心部的抗拉强度和断后伸长率分别为308.27 MPa和8.55%, 圆棒边部的抗拉强度和伸长率分别为322.40 MPa和11.96%, 与未施加电磁场的圆棒相比, 此时圆棒心部与边部组织性能差异减小。

关键词: Al-Zn-Mg-Cu合金; 半连续铸造; 低频电磁场; 晶粒细化; 显微偏析

作者简介:

王睿(1993-), 男, 硕士, 研究方向为物理外场辅助半连续铸造。电话: 13840565037, E-mail: 2370653198@qq.com

通讯作者:

张浩宇, 男, 讲师, 博士。E-mail: zhanghaoyu@sut.edu.cn

中图分类号: TG249.7

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2020)03-0240-06

基金项目:

广东省科学院院属骨干科研机构创新能力建设项目(2018GDASCX-0117); 广东省科技厅公益研究与能力建设项目(2017A070701029)。

收稿日期:

2019-09-15 收到初稿, 2019-10-21 收到修订稿。

铝合金具有比强度高、导热性能好、易加工成形等优点^[1-2], 因而广泛用于平板电脑、数码相机、智能手机、学习机等便携式电子产品的外壳, 如背板、中框等^[3]。随着电子产品轻薄化的发展, 急需高强度的铝合金外壳来提高产品的抗压、抗摔性能, 以避免产品受压或跌落时出现弯曲、凹陷、划伤等问题。

Al-Zn-Mg-Cu合金属于可热处理强化的高强度铝合金, 满足电子产品轻薄化发展对高强度铝合金外壳的强度需求。但Al-Zn-Mg-Cu合金的合金化程度较高, 晶界温度范围较宽, 导致半连续铸锭容易产生元素宏微观偏析、晶粒粗大和热裂纹等缺陷^[4-5], 严重影响铸锭的塑性加工性能, 降低铸锭的质量和成品率。崔建忠等^[6-7]研究了低频电磁场对半连续铸造7050、7075合金铸锭显微组织的影响, 结果表明, 低频电磁场可以减弱半连续铸锭的元素宏微观偏析程度, 细化铸锭晶粒组织, 并抑制热裂纹产生。

本试验采用低频电磁场半连续铸造技术制备了直径200 mm的Al-Zn-Mg-Cu合金圆棒, 研究了电磁场频率对Al-Zn-Mg-Cu合金圆棒显微组织与力学性能的影响。

1 试验材料与方法

试验材料为Al-Zn-Mg-Cu合金, 设备包括: 300 kg熔炼炉和电磁场半连续铸造机。在熔炼炉内于750 °C加热熔化工业纯铝(99.7%, 质量分数, 下同), 然后加入纯锌(99.9%)、纯镁(99.9%)以及Al-10Cu中间合金, 搅拌熔化成铝合金液, 取样并用SPECTRO MAX x型直读光谱仪测定铝合金液的成分, 结果如表1所示。

采用纯度为99.99%的氩气和精炼剂对铝合金液进行喷吹精炼除气除杂, 经扒渣后, 降低至730 °C并保温30 min, 最后将铝合金液在低频电磁场作用下半连续铸造成直径200 mm的圆棒, 铸造速度为80 mm/min, 冷却水流量为50 L/min, 电磁场电流为250 A, 电磁场频率分别为0、15 Hz、30 Hz和45 Hz, 连铸示意图如图1。电磁线圈

由水平缠绕、相互绝缘的线圈构成，采用正弦交变电流，线圈匝数为100，频率在0~45 Hz之间属于低频电磁场。

试验完成后，在铝合金圆棒的边部和心部取样，试样经磨制、抛光和腐蚀后，在LEICA-DMI3000M型光学显微镜上进行显微组织观察，采用截线法测量晶粒的平均尺寸，在SU8200系列场发射扫描电镜上观察第二相形貌和分布，并进行电子探针分析第二相成分组成。试样加工成标准拉伸试样后，在DNS200型电子拉伸试验机上进行室温拉伸，拉伸速度为2 mm/min，拉伸试样的形状尺寸如图2所示。

2 试验结果与分析

2.1 显微组织

图3、4为不同电磁场频率下半连续铸造Al-Zn-Mg-Cu合金的显微组织和 α -Al平均晶粒尺寸。由图可知，边部组织大部分区域为等轴晶组织，但是也存在小部分的枝晶，平均晶粒尺寸为84.84 μm ，而心部则以枝晶为主，仅有少量的等轴晶， α -Al晶粒较为粗大，平均晶粒大小为92.72 μm ，心部与边部的晶粒尺寸差异较大，组织均匀性较差。当频率升高到15 Hz时，心部 α -Al晶粒尺寸和形状变化很小，也是呈现出枝晶与等轴晶交错存在的状态，平均晶粒尺寸为92.55 μm ，尺寸则进一步细化，枝晶基本消失，平均晶粒尺寸降至76.27 μm 。随着频率的继续升高，心部和边部的晶粒细化明显，当频率达到45 Hz时，心部树枝晶基本消失，心部和边部均为细小均匀的等轴晶，平均晶粒尺寸分别为76.55 μm 和70.31 μm ，心部与边部的

表1 Al-Zn-Mg-Cu合金成分
Table 1 Chemical composition of Al-Zn-Mg-Cu alloy $w_B/\%$

Zn	Mg	Cu	Fe	Si	Ti	Al
5.69	0.82	0.44	0.15	0.05	<0.015	余量

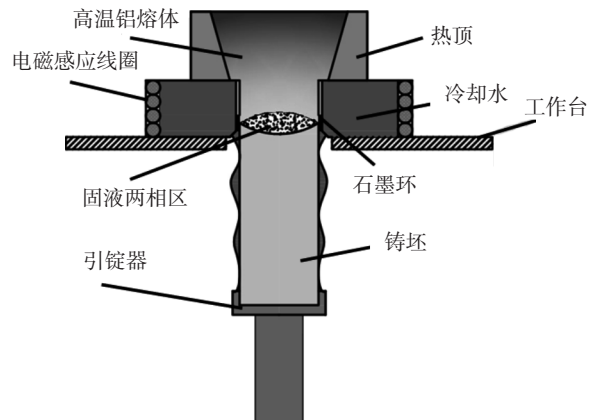


图1 低频电磁铸造示意图
Fig. 1 Schematic diagram of LFEC process

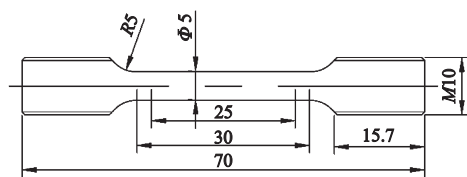
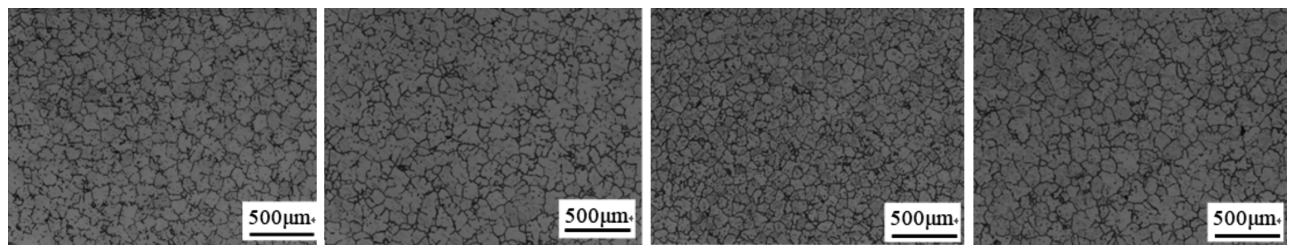
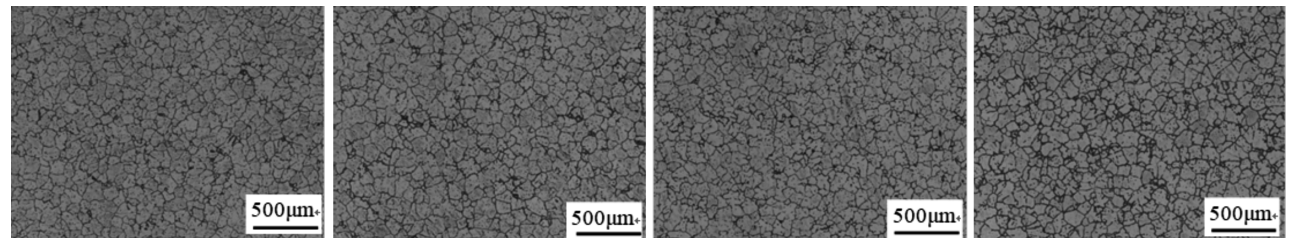


图2 拉伸试样的形状尺寸
Fig. 2 Shape and dimension of tensile specimens



(a) 0, 边部 (b) 0, 心部 (c) 15 Hz, 边部 (d) 15 Hz, 心部



(e) 30 Hz, 边部 (f) 30 Hz, 心部 (g) 45 Hz, 边部 (h) 45 Hz, 心部

图3 不同频率及不同位置的显微组织

Fig. 3 Microstructures at the center and edge of Al-Zn-Mg-Cu alloy bar under different electromagnetic frequencies

晶粒尺寸差值由频率为0时的 $7.88\ \mu\text{m}$ 降至45 Hz时的 $6.24\ \mu\text{m}$ ，心部与边部的晶粒均匀性明显提高，组织均匀性显著改善。

图5为电磁场不同频率下Al-Zn-Mg-Cu合金第二相形貌及分布情况。经能谱分析可知，晶界处亮白色的相为 MgZn_2 ，浅灰色的相为 Al_3Fe （富Fe相）。由图5a、b可知，未加电磁场时，心部富Fe相粗大，在晶界处连续分布，而边部富Fe相较为细小，且断续分布，心部和边部的 MgZn_2 相较少且较为粗大；随着电磁场频率的升高，第二相尺寸变得细小，分布趋于均匀；电磁场频率达到45 Hz时，心部和边部粗大的富Fe相基本消失，心部和边部出现更多的 MgZn_2 相，且为圆球状均匀分布。

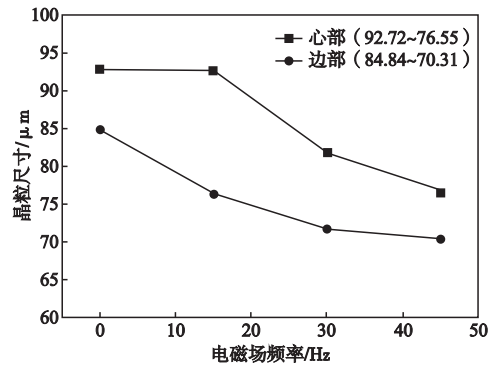


图4 低频电磁场频率对晶粒尺寸的影响

Fig. 4 Influence of electromagnetic frequency on grain sizes

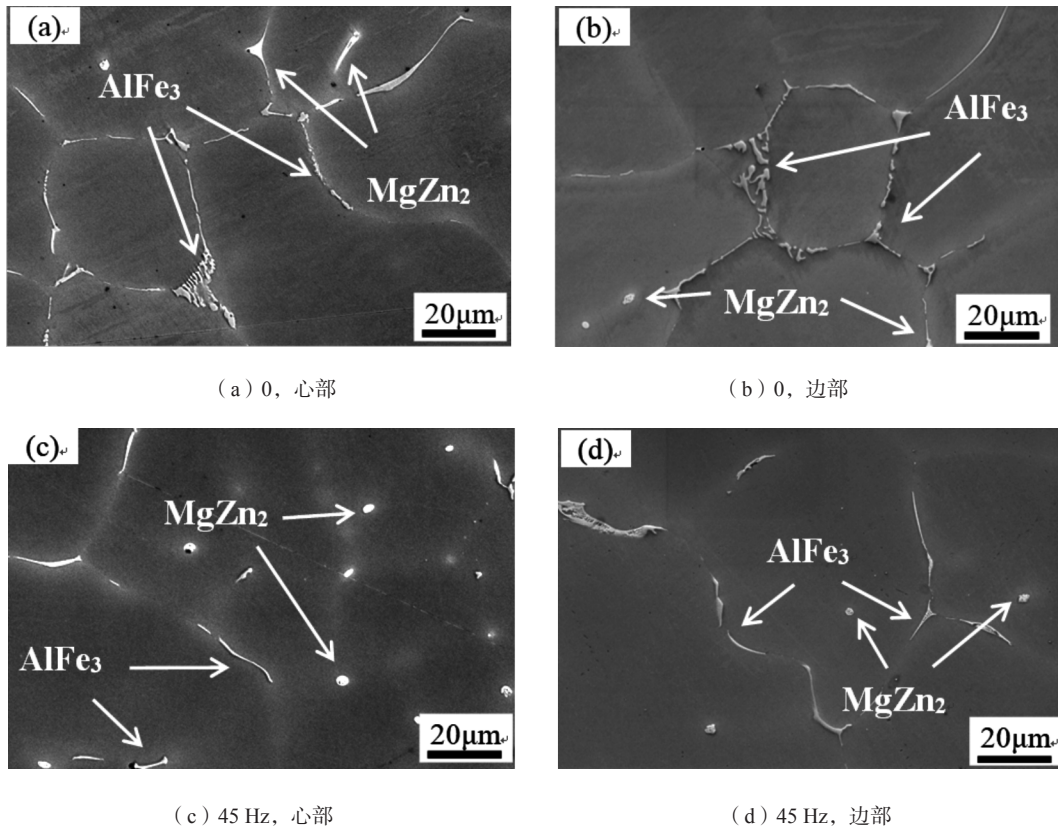


图5 不同电磁场频率条件下的第二相形貌图

Fig. 5 SEM images of the second phases in as-cast Al-Zn-Mg-Cu alloys with different electromagnetic frequencies

2.2 元素偏析

图6为Al-Zn-Mg-Cu合金铸锭不同位置合金元素在 α -Al基体中含量随电磁场频率变化的曲线。图6a表明：随着电磁场频率的升高，Zn元素在 α -Al基体中先升高，后下降，又升高。当电磁场频率为0时，心部与边部的Zn元素都为正偏析，电磁场频率升高到15 Hz时，基体中Zn元素含量继续升高，偏析加重，随后Zn

元素含量又急剧下降，心部为轻微正偏析，边部为负偏析，当频率达到45 Hz时，心部表现为轻微的正偏析，而边部则为轻微的正偏析。频率变化对于Zn元素在心部偏析改善明显，当频率达到30 Hz时，Zn元素偏析现象基本消失，继续升高频率Zn元素含量仍然稳定。

2.3 力学性能

图7为Al-Zn-Mg-Cu合金铸锭拉伸力学性能随电磁场频率的变化曲线。可知,心部的合金力学性能随着电磁场频率的升高而逐渐提升,而边部的力学性能则是先降低,后升高。与电磁场频率为0时相比,当频率达到45 Hz时,心部抗拉强度由279.95 MPa升高到了308.27 MPa,抗拉强度提升了10.12%,而断后伸长率则由5.97%升高到了8.55%。当频率由0升高到15 Hz时,边部的抗拉强度由308.64 MPa下降到了291.37 MPa,断后伸长率也由11.44%下降到了8.24%,随着电磁场频率的升高,合金铸锭的抗拉强度和断后伸长率均缓慢升高,当频率达到45 Hz时,合金铸锭的抗拉强度和断后伸长率分别达到了322.40 MPa和11.96%,与电磁场频率为0时相比,抗拉强度提高了4.46%,而断后伸长率则提高了4.55%。

试验结果表明:电磁场频率的升高对于Al-Zn-Mg-Cu合金的拉伸力学性能有显著改善,提高了心部和边部的力学性能,且降低了心部与边部的力学性能差异,提高了合金力学性能的稳定性的。

2.4 讨论

试验材料为高合金化的Al-Zn-Mg-Cu合金,合金圆棒直径达到了200 mm,根据凝固原理和基本传热规律可知:圆棒边部冷却速度明显高于心部冷却速度,使得合金元素来不及充分扩散,因而在合金圆棒截面上造成了严重的合金元素偏析现象,大量合金元素沿晶界析出,形成粗大的共晶组织。在未施加电磁场频率时,由于熔体流动能力有限,使得合金圆棒中存在严重的偏析现象,第二相呈连续的网状结构(图5a、b),这种粗大的第二相会对合金圆棒的力学性能造成极大的负面影响;而当施加电磁场频率时,合金熔体

的流动性会在磁场产生的洛伦兹力作用下明显提高,因而对于合金的凝固和元素扩散产生了积极影响,使得晶间第二相明显细化,且分布趋于均匀(图5c、d),同时合金圆棒的抗拉强度和断后伸长率也明显改善。

电磁场电流恒定为250 A,频率变化会改变磁场的作用深度和磁场强度^[8]。导电熔体在交变磁场作用下,熔体内部会产生感生电流,在感生电流与交变电场的双重物理场作用下熔体会受到洛伦兹力的作用,洛伦兹力见式(1)^[9]。

$$F = J \times B = -\frac{1}{(2\mu)} \nabla(B^2) + \frac{1}{\mu} (B \cdot \nabla) B \quad (1)$$

式中:力(F)分成两个部分,第一部分力是沿径向指向铸锭心部,第二部分力是垂直指向,但是熔体会受到凝固合金的阻碍形成逆时针的环流,且熔体内各部分受力均沿铸锭轴线呈轴对称分布^[10]。而磁场的渗透深度可以用集肤效应(式2)^[11]来表述。

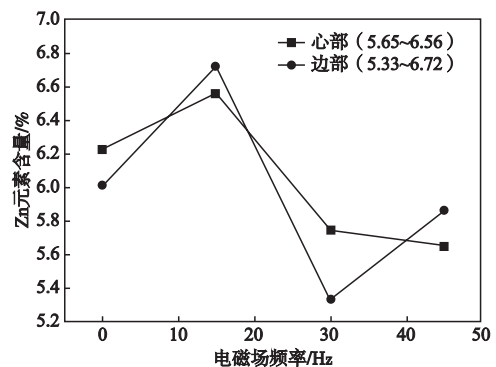


图6 Zn元素在基体中含量随电磁场频率的变化
Fig. 6 Zn element rate of aluminum billet under different electromagnetic frequencies

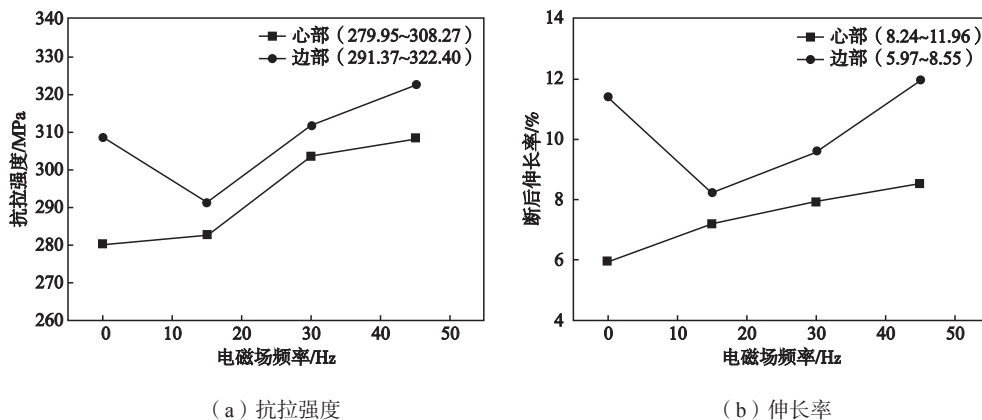


图7 电磁场频率变化对合金力学性能的影响

Fig. 7 Mechanical property of Al-Zn-Mg-Cu alloy under different electromagnetic frequencies

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\sigma\pi\mu f}} \quad (2)$$

式中： σ 和 μ 分别表示金属熔体的电导率和磁导率； f 为磁场频率。

首先，洛伦兹力会破坏熔体两相区中已形成的枝晶，这种效应会对晶粒细化产生两个积极的作用。第一是非均匀形核存在极限形核率，而洛伦兹力的搅拌作用，可以使原有的枝晶破碎，裸露出更多形核基底，使得形核率保持在较高的水平；第二是破碎的枝晶在洛伦兹力的作用下弥散分布于熔体两相区，增加形核质点，提高了形核率。二者的双重作用会大幅细化晶粒，改善合金的组织均匀性，减小了心部与边部的 α -Al平均晶粒尺寸差异，提高了晶粒尺寸的均匀性。

在15 Hz和30 Hz时，出现心部与边部晶粒尺寸差异增大是电磁场渗透深度与搅拌强度竞争的结果。在低频磁场频率变化的过程中，频率大小会影响磁场的渗透深度以及磁场的强度两个变量，其中磁场频率升高会降低磁场的渗透深度，但是会提高磁场强度，进而提高搅拌强度。根据式(2)计算可得：15 Hz和30 Hz时，磁场的渗透深度分别为：21.96 mm和15.53 mm。因为边部始终处于磁场的搅拌范围内，且磁场的强度在持续升高，因而边部持续细化。由式(1)可知：受到频率变化影响的洛伦兹力会以指数形式增大，而渗透深度仅减少了6.43 mm，因而对于心部组织的影响因素中，搅拌强度占据了主导地位，因此心部组织会大幅细化，缩小了心部与边部的晶粒尺寸差异，改善了合金的组织均匀性。

其次，电磁场的搅拌作用会改善合金元素的分布情况^[12]，进而改善偏析和元素固溶效果。合金元素在铸锭中的存在形式有两种：固溶体和第二相。由图4可知：随着电磁场频率的升高，晶间第二相的数量和尺寸大小显著降低，合金元素大多固溶于 α -Al基体中，并且会大幅改善Zn元素严重的正偏析。

半连铸过程中，由于边部冷却速度快，因而Zn元素来不及扩散，所以在边部容易产生严重的偏析^[13]。由于Zn元素熔点低以及心部散热慢，因而心部很容易聚集大量的低熔点合金元素，所以心部的Zn元素偏析严重。

当电磁场频率较低时，磁场的搅拌作用有限，无法使熔体内的合金元素均匀分布，所以导致了合金内元素的偏析，而当频率升高到45 Hz时，此时熔体内的洛伦兹力足够大，使得熔体内的合金元素分布均匀，并且有研究表明：电磁场作用下的熔体处于过冷状态、温度场梯度较小^[6、13]，且液穴也较小^[10]，所以可以保证截面结晶的均匀性，大幅改善了合金的偏析情况。

最后，因为合金晶粒细化和组织均匀性的提高，提高了合金塑性变形过程中的变形均匀性和变形程度，所以合金的断后伸长率有所改善。此外，合金元素偏析的改善，细小弥散第二相的出现，有效提高了合金变形过程的变形抗力，对合金的强度有着较为明显的改善。

3 结论

(1) 低频电磁场对于Al-Zn-Mg-Cu合金组织改善明显，随着电磁场频率的逐渐增加，圆棒横截面的 α -Al晶粒逐渐从枝晶转变为等轴晶，晶粒尺寸减小，Zn元素偏析现象基本消除，晶间MgZn₂相和Al₃Fe相的尺寸细化，圆棒的拉伸力学性能提高。

(2) 与未施加电磁场的圆棒相比，此时圆棒心部和边部组织性能的差异先增大，后减小；在频率为45 Hz时，圆棒截面组织性能均匀性达到最佳。

(3) 当电磁场频率增加到45 Hz时，圆棒心部的抗拉强度和断后伸长率分别为308.27 MPa和8.55%，圆棒边部的抗拉强度和断后伸长率分别为322.40 MPa和11.96%。

参考文献：

- [1] 张铁军, 何敬志. 3C产品塑料与铝合金外壳材料的生命周期评价[J]. 轻合金加工技术, 2008, 36(10): 42-49.
- [2] 江钟宇, 林盛, 方小明. 笔记本电脑外壳材料及其专利技术发展趋势简析[J]. 轻合金加工技术, 2019, 47(6): 20-23.
- [3] 蔡春彬. 铝合金手机边框铣削用3C铣刀研制及切削性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2017.
- [4] CUI J Z, ZHANG Z Q, LE Q C. DC casting of light alloys under magnetic fields[J]. Transaction of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(11): 2046-2050.
- [5] 左玉波, 赵志浩, 朱庆丰, 等. 低频电磁场对7050铝合金铸锭组织的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2012, 32(7): 589-592.
- [6] 张北江, 崔建忠. 电磁场频率对电磁铸造7075铝合金微观组织的影响[J]. 金属学报, 2002, 38(2): 215-218.

- [7] 张勤, 崔建忠, 路贵民. 电磁振荡对半连铸7075Al合金的宏观偏析的抑制作用 [J]. 铸造, 2003, 52 (3): 171-175.
- [8] 屈福, 崔建忠. 提高铝合金连铸坯表面质量的连铸技术 [J]. 铸造, 2008, 57 (12): 1229-1232.
- [9] 史立峰, 赵大志, 康皓, 等. 低频电磁场频率对ZL201合金组织的影响 [J]. 铸造, 2005, 54 (4): 360-362.
- [10] 陈清伟, 邱望标, 陈伟兴. 基于ANSYS的集肤效应分析 [J]. 贵州科学, 2012, 30 (1): 58-62.
- [11] 郭世杰, 薛冠霞, 刘金炎, 等. 电磁软接触铸造7050高强铝合金扁锭的组织 and 力学性能 [J]. 中国有色金属学报, 2010, 20 (7): 1282-1289.
- [12] VANJA H, BOSTJAN M, NEJC K, et al. Simulation of direct chill casting under the influence of a low-frequency electromagnetic field [J]. Applied Mathematical Modelling, 2018 (54): 170-188.
- [13] LUO Y J, ZHANG Z F. Numerical modeling of annular electromagnetic stirring with intercooling in direct chill casting of 7005 aluminum alloy billet [J]. Progress in Natural Science: Materials International, 2019 (29): 81-87.

Effects of Electromagnetic Field Frequency on Microstructure and Mechanical Properties of Al-Zn-Mg-Cu Alloy Prepared by Direct Chill Casting

WANG Rui^{1, 2}, ZHANG Hao-yu¹, WANG Shun-cheng³, WU Xi-kun³

(1. School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, Liaoning, China; 2. Guangdong Institute of Materials and Processing, Guangzhou 510651, Guangdong, China; 3. Guangdong Xingfa Aluminum Co., Ltd., Foshan 528137, Guangdong, China)

Abstract:

Al-Zn-Mg-Cu alloy bar with a diameter of 200 mm has been successfully prepared through the low-frequency electromagnetic field (LFEF). The microstructure and mechanical properties of the as-synthesized samples are characterized by optical microscope, scanning electron microscope and electronic tensile testing machine. The experimental results demonstrate that the increase of the LFEF frequency results in α -Al grains change from dendrites to equiaxed grains, decreases the size of grains and the degree of segregation of Zn element, refines the sizes of the intergranular MgZn₂ phase and the Al₃Fe phase, and improves the tensile mechanical properties of the round bar. The tensile strength and elongation after fracture of the alloy show a significant increase at the center (308.27 MPa and 8.55%) and the edge (322.40 MPa and 11.96%). Compared with the round bar without applying an electromagnetic field, the difference between the center and the edge of the rod in the microstructure and mechanical properties shortens.

Key words:

Al-Zn-Mg-Cu alloy; direct chill casting; low frequency of electromagnetic field; grain refinement; microsegregation