

低频电磁铸造细化铝合金组织的机理

左玉波, 赵志浩, 朱庆丰, 崔建忠

(东北大学 材料电磁过程研究教育部重点实验室, 沈阳 110819)

摘要: 为了了解电磁场对组织细化作用的机理, 采用低频电磁铸造方法制备直径 200 mm Al-Zn-Mg-Cu-Zr 合金铸锭, 并对铸造过程中的温度场进行测量。结果表明: 施加磁场产生的强制对流使得温度场均匀且低于液相线约 6 °C。结晶器中熔体温度场的变化显著改变了熔体从开始浇注到完全凝固的热历史, 从而有效促进了异质形核, 显著减少晶核的重熔, 使更多晶核能够生存下来, 并最终促进形成均匀、细小的微观组织。

关键词: Al-Zn-Mg-Cu-Zr 合金; 低频电磁铸造; 温度场; 晶粒细化; 细化机理

中图分类号: TG249.7

文献标志码: A

Mechanism of grain refinement of aluminum alloy achieved by low frequency electromagnetic casting process

ZUO Yu-bo, ZHAO Zhi-hao, ZHU Qing-feng, CUI Jian-zhong

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

Abstract: In order to understand the mechanism of grain refinement achieved by electromagnetic field, ingots of an Al-Zn-Mg-Cu-Zr alloy with diameter of 200 mm were cast and the temperature field was measured during the casting process. The results show that the electromagnetic field can induce the forced convection, leading to a quite uniform temperature field and a low temperature (6 °C below the liquidus). Therefore, the thermal history of the melt from pouring to being solidified is changed obviously, resulting in an enhanced heterogeneous nucleation and remarkable decrease of the remelting of the formed nuclei and the formation of fine and uniform spherical equiaxed microstructure.

Key words: Al-Zn-Mg-Cu-Zr alloy; low frequency electromagnetic casting; temperature field; grain refinement; refinement mechanism

电磁场在冶金与材料制备过程中的应用^[1-2]主要包括电磁悬浮熔炼、电磁搅拌、电磁感应加热、电磁净化、电磁制动、电磁侧封、电磁离心铸造、电磁雾化沉积、电磁铸造(Electromagnetic casting, EMC)等。其中, 电磁铸造方面的研究获得较多的关注。相对于电磁铸造^[3]和电磁软接触细晶铸造(CREM)^[4-5], 低频电磁铸造(LFEC)^[6-10]采用更低的电磁场频率, 获得了更大的磁场渗透深度, 有利于提高铸锭组织均匀性和获得更好的组织细化效果。实验研究表明, 低频电磁铸造对铸锭具有显著的晶粒细化作用^[8-9]。目前, 关于

电磁场细化组织的机理, 一般认为是电磁场引起强制对流, 强制对流破碎或熔断枝晶臂, 从而促进晶粒的增殖^[7-9, 11-15]。但是, 也有学者认为熔体流动不足以破碎枝晶臂^[16-17]。枝晶臂的破碎或熔断可能对组织细化起到很重要的作用, 特别是在施加电磁场的初始阶段, 因为此时铸锭组织由枝晶组织转变为球形的等轴晶组织。可是, 当低频电磁场进入稳定状态后, 铸锭组织为球形或近球形的等轴晶组织, 此时枝晶臂不发达或者没有枝晶臂, 因此, 枝晶臂的破碎或熔断难以发生。目前, 电磁场细化组织的主要原因尚不清楚,

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目(51104043); 国家基础研究发展计划项目(2012CB619506)

收稿日期: 2012-02-12; **修订日期:** 2012-06-11

通信作者: 左玉波, 博士; 电话: 024-83687734; E-mail: zuoyubo@epm.neu.edu.cn

因此, 需要进一步对电磁场细化组织机理进行研究。为此, 本文作者采用低频电磁铸造工艺制备直径为 200 mm 的铝合金铸锭, 在低频电磁铸造的同时测量温度场, 探讨电磁场细化组织的作用机理。

1 实验

采用 Al-9.8Zn-2.4Mg-2.2Cu-0.12Zr 铝合金作为实验材料。测得该合金的液相线为 632 °C。合金中主要合金元素 Al、Zn、Cu 和 Mg 分别以工业纯铝、锌、铜和镁为原料, 微量元素 Zr 以复合锆盐(原料为氟锆酸钾、氯化锂和氟化钙)加入。合金在 500 kW 中频感应加热炉内熔炼, 熔体在 750 °C 左右经过除气和扒渣后转入电阻静置炉(中间包)。

采用相同的铸造工艺参数(铸造速度 80 mm/min、铸造温度 730 °C、冷却水量 70 L/min)分别进行常规 DC(Direct chill)铸造和低频电磁铸造(LFEC, 电磁场频率 25 Hz)。铸造时采用 K 型热电偶连续测温, 通过数据采集器将测量数据存储到计算机中, 数据采集速率为 10 次/s。铸造及测温过程示意图如图 1 所示。制备 $\phi 200$ mm 铸锭的结晶器由不锈钢加工而成, 内嵌石墨环。电磁线圈由铜管缠绕而成, 互相绝缘, 内通冷却水, 匝数为 80, 布置在结晶器外, 工作电流为 120 A。热电偶 T1 固定在结晶器内石墨环上沿的高度靠近结

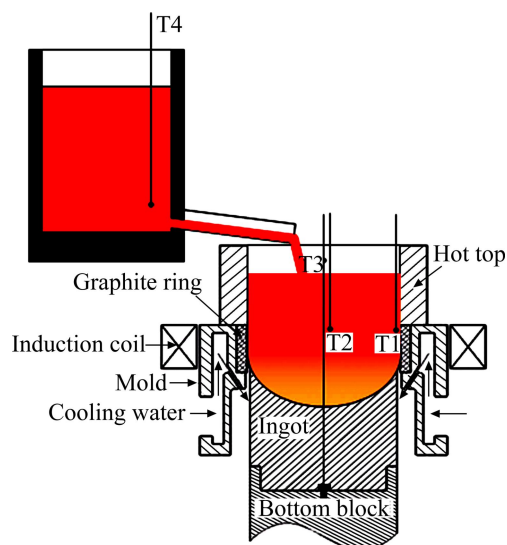


图 1 低频电磁铸造过程及温度场测量示意图

Fig. 1 Schematic diagram of LFEC process and measurement of temperature field: T1—Thermocouple near wall of mould; T2—Thermocouple in centre of mould; T3—Movable thermocouple in center of mould and/or ingot; T4—Thermocouple in furnace

晶器壁的位置; 热电偶 T2 固定在结晶器内石墨环上沿结晶器中心的位置; 热电偶 T3 则固定在连接到引锭中心的不锈钢丝上; 热电偶 T4 放置在中间包内用于监测炉内熔体的温度。在铸造过程中, 热电偶 T1 和 T2 不动, T3 随着铸锭从上向下移动。

微观组织试样经抛光后, 采用 5% HBF₄(体积分数)溶液进行阳极氧化, 并采用 Leica DMR 光学显微镜在偏振光下进行组织观察。

2 结果与分析

2.1 DC 铸造和低频电磁铸造铸锭的微观组织

通过在半连续铸造过程中施加低频电磁场和停止施加磁场实现 LFEC 铸造和停止施加磁场铸造, 制备超高强铝合金铸锭。铸锭总长 1.6 m, 其中, 前半部分为低频电磁铸造, 后半部分为常规 DC 铸造。分别在铸锭的前半段和后半段取样, 阳极制膜后, 利用偏振光观察到的组织如图 2 所示。由图 2 可见, 常规 DC 铸锭基本为等轴枝晶组织, 晶粒较粗大, 而低频电磁铸锭的组织显著细化。

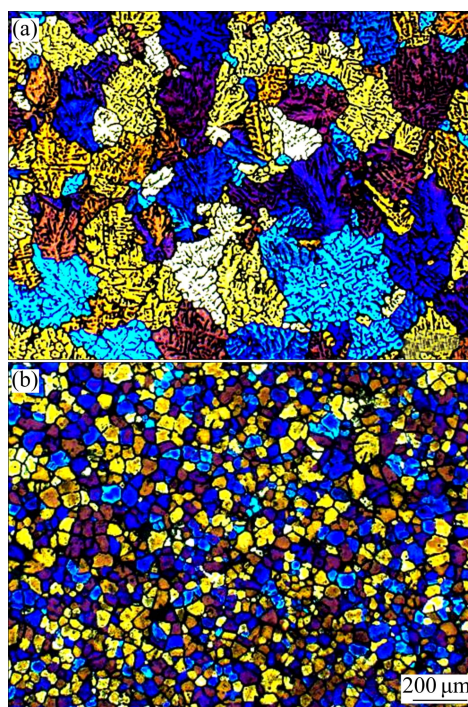


图 2 常规 DC 铸造和低频电磁铸造铝合金铸锭的微观组织

Fig. 2 Microstructures of aluminium alloy billets processed by conventional DC casting (a) and LFEC process (b)

2.2 DC 铸造和低频电磁铸造过程中的温度场

在相同的铸造工艺参数下, 分别通过常规 DC 铸

造和低频电磁铸造制备 d 200 mm 铸锭, 并在半连续铸造过程中连续测温。

热电偶 T1、T2 和 T4 所记录温度曲线如图 3 所示。在常规 DC 铸造过程炉内温度保持恒定的情况下(热电偶 T4), 结晶器内中心和靠近结晶器壁处温度基本保持恒定, 但中心处温度较高, 约为 665 °C, 而边部温度较低, 接近于液相线温度。可见, 常规 DC 铸造过程中, 结晶器内熔体在径向存在一个温度梯度, 即中心处温度明显高于边部温度。在低频电磁铸造过程中, 同样在炉内温度保持稳定的情况下, 结晶器内中心和靠近结晶器壁处温度也基本保持恒定, 但低频电磁铸造与常规 DC 铸造相比, 有如下两点不同: 1) 中心处温度和边部温度基本相同, 并出现局部的交错; 2) 中心处温度和边部温度都稍低于液相线温度。这说明在低频电磁铸造过程中, 结晶器内熔体在径向温度分布是均匀的, 中心处和边部温度差很小。

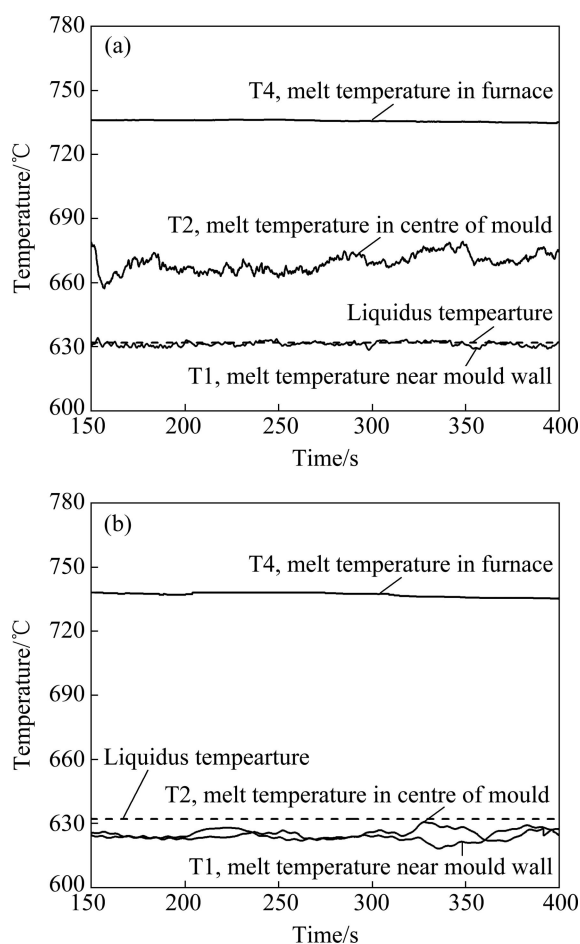


图 3 热电偶 T1、T2 和 T4 所记录的常规 DC 铸造和低频电磁铸造铝合金熔体的温度曲线

Fig. 3 Measured temperature curves of aluminum alloy melt by thermocouples T1, T2 and T4 during conventional DC casting (a) and LFEC process (b)

热电偶 T3 随着铸锭从上向下移动, 因此能够记录熔体浇注进入结晶器后的变化情况, 从而获得结晶器内中熔体在轴向的温度分布。图 4 所示为热电偶 T3 在铸造过程中随着铸锭向下移动由空气进入熔体直至凝固的过程。在常规 DC 铸造过程中, 热电偶 T3 进入液面后迅速升温到液相线以上, 最高温度达到约 680 °C, 然后随着热电偶 T3 向下移动, 温度逐渐下降, 直至凝固。这说明在常规 DC 铸造过程中, 结晶器内熔体在轴向存在一个温度梯度, 上部熔体温度明显高于液穴底部温度。在低频电磁铸造过程中, 温度曲线发生了显著变化, 热电偶 T3 进入液面后迅速升温, 但是温度最高只到液相线附近, 而且热电偶进入熔体后温度保持稳定, 几乎没有温度变化, 一直保持到凝固开始。这说明在低频电磁铸造过程中, 结晶器内熔体在轴向温度分布非常均匀, 熔体上部和底部几乎没有温度差。为了更精确地了解温度变化情况, 图 4(b)

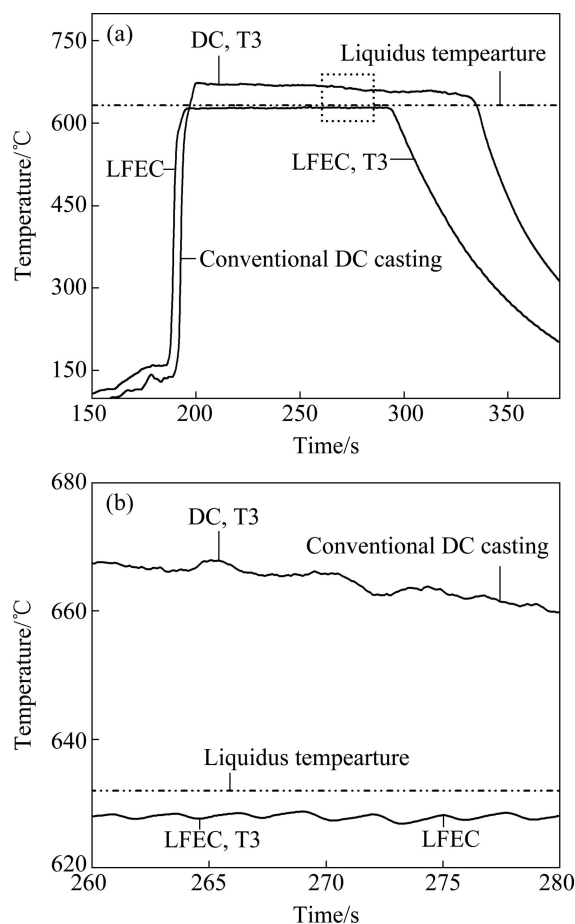


图 4 热电偶 T3 所记录的常规 DC 铸造和低频电磁铸造铝合金熔体温度曲线

Fig. 4 Measured temperature curves of aluminum alloy melt by thermocouple T3 during conventional DC casting and LFEC process: (a) Whole curves; (b) Magnification of indicated rectangular area in Fig. 4(a)

所示为对图 4(a)中的虚线方形区域的放大图。尽管在电磁铸造过程中热电偶进入熔体后温度曲线有轻微的波动,但是熔体温度始终保持在液相线以下 6°C 左右。另外,由图 4(a)可见,与常规 DC 铸造相比,在低频电磁铸造过程中,热电偶从进入熔体到发生凝固的时间明显缩短,这说明电磁铸造过程中液穴显著变浅,这有利于抑制铸造裂纹、提高铸锭质量。

综上所述,在常规 DC 铸造过程中,结晶器内熔体温度场不均匀,在轴向和径向都存在温度梯度,上部温度高于底部温度,中心温度高于边部温度。在低频电磁铸造过程中,结晶器内整个熔体温度场非常均匀。上部与底部、中心与边部温度差很小,这主要是由电磁场的强制对流引起。另外,一个非常重要的现象是,在低频电磁铸造过程中结晶器内熔体温度低于液相线 6°C 左右。

2.3 组织细化机理分析

FLEMINGS^[18]提出了对流作用下枝晶破碎和枝晶熔断理论,认为在搅拌作用下树枝状晶发生机械断裂或根部颈缩,枝晶碎片在搅拌对流作用下被带入熔体内部,形成新的晶核。HELLAWELL 等^[19]认为,在固液两相区,枝晶难以机械断裂,可能发生枝晶臂的熔断。然而,低频电磁铸造铸锭组织为如图 2(b)所示的球形晶粒,没有发达的枝晶臂,因此,很难发生枝晶臂的熔断。可见,应该有其他更重要的原因导致低频电磁铸造的晶粒细化。

基于所测得温度场,常规 DC 铸造和低频电磁铸造过程中熔体的冷却曲线示意图如图 5 所示。冷却曲线大致分为 4 个阶段:第 1 阶段为熔体由保温炉到流槽端部的温度变化,测量所得熔体流到流槽端部时的温度约为 690°C ;第 2 阶段为熔体从流槽端部进入熔体的温度变化;第 3 阶段为从结晶器内的熔体顶部到底部的温度变化;第 4 阶段为液穴底部至凝固的温度变化。电磁场对于第 1、4 阶段的冷却基本没有影响,但对第 2、3 阶段的冷却具有重要影响。常规 DC 铸造时在冷却曲线的第 2 阶段,熔体由流槽端部到进入结晶器内,由于流动本身的对流和混合作用,所以得到快速冷却直至达到结晶器内上部熔体的温度(约 670°C ,高于液相线温度)。在低频电磁铸造时,电磁场产生的强制对流强度是自然对流强度的 5 倍,甚至更高^[20],获得了更好的换热条件和均匀的温度场。因此,在冷却曲线的第 2 阶段,熔体由流槽到进入结晶器内时受到极快速的冷却,并且直接冷却到液相线温度以下 6°C 左右。极快的冷却速率必然激活铝合金熔体中潜在的形核基体,如氧化物、金属间化合物、结晶器

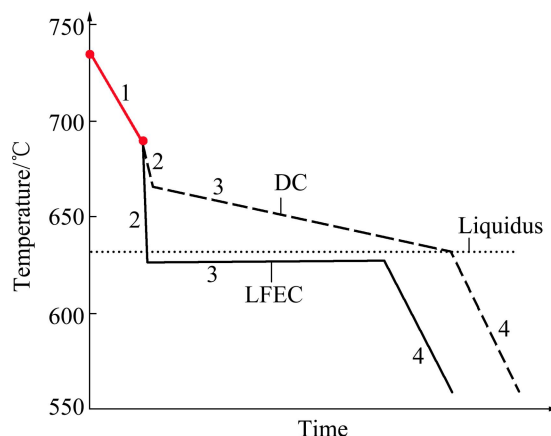


图 5 常规 DC 铸造和低频电磁铸造过程中的冷却曲线示意图

Fig. 5 Schematic diagram of cooling curves in conventional DC casting process and LFEC process

壁及其他杂质颗粒等。因此,在电磁场作用下形核率显著增加。电磁场对第 3 阶段的影响表现在,施加磁场后,结晶器内整个熔体的温度场非常均匀,而且保持在液相线温度以下 6°C 左右。因此,在常规 DC 铸造过程中,形核只发生在固、液界面附近的区域,而低频电磁铸造时,整个熔体发生形核。同时,由于熔体的温度低于液相线温度,所以形成晶核的存活率显著增加。这对最终形成均匀、细小的组织起到非常重要的作用。

在低频电磁铸造过程中,晶粒的长大过程发生在强制对流和均匀温度场的情况下,成分过冷得到明显的抑制,晶粒难以枝晶长大,相反促进了晶粒球形长大。由于熔体中有效晶核数目显著增加,晶核长大过程尚未发展到枝晶生长便彼此接触,并最终形成均匀、细小的球形或多边形等轴晶组织。

3 结论

1) 施加低频电磁场对 DC 铸造过程中结晶器内熔体的温度场具有显著影响。施加磁场后,结晶器内的整个熔体的温度场变得非常均匀,并且熔体温度低于液相线温度 6°C 左右。

2) 低频电磁铸造工艺对铝合金具有显著的晶粒细化作用。其细化铝合金组织的主要机理为强制对流改变了结晶器中熔体温度场的分布,改变了熔体从浇注到凝固的热历史,有效提高了异质形核速率,显著减少了晶核的重熔,促进了晶粒球形长大,从而形成了均匀、细小的微观组织。

REFERENCES

- [1] 李润生, 王为钢, 赫冀成. 电磁冶金概述[J]. 钢铁, 1998, 22(4): 70-73.
LI Run-sheng, WANG Wei-gang, HE Ji-cheng. On electromagnetic metallurgy [J]. Iron and Steel, 1998, 22(4): 70-73.
- [2] 郭景杰, 张铁军, 苏彦庆, 丁宏升, 贾均. 电磁技术在铸造中的应用[J]. 特种铸造及有色合金, 2002(3): 37-39.
GUO Jing-jie, ZHANG Tie-jun, SU Yan-qing, DING Hong-sheng, JIA Jun. Research and application of electromagnetic technology in foundry [J]. Special Casting and Nonferrous Alloys, 2002(3): 37-39.
- [3] GETSELEV Z N. Casting in an electromagnetic mold [J]. J Met, 1971, 10: 38-43.
- [4] VIVES C. Electromagnetic refining of aluminum alloys by the CREM process: Part I. Working principle and metallurgical results [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 1989, 20(5): 623-629.
- [5] VIVES C. Electromagnetic refining of aluminum alloys by the CREM process: Part II. Specific practical problems and their solutions [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 1989, 20(5): 631-643.
- [6] DONG J, ZHAO Z, CUI J, YU F, BAN C. Effect of low-frequency electromagnetic casting on the castability, microstructure, and tensile properties of direct-chill cast Al-Zn-Mg-Cu alloy [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2004, 35(8): 2487-2494.
- [7] ZHANG B, CUI J, LU G. Effects of low-frequency electromagnetic field on microstructures and macrosegregation of continuous casting 7075 aluminum alloy [J]. Materials Science and Engineering A, 2003, 355(1/2): 325-330.
- [8] ZHAO Z, CUI J, DONG J, WANG Z, ZHANG B. Effect of low-frequency magnetic field on microstructures of horizontal direct chill casting 2024 aluminum alloy [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2005, 396(1/2): 164-168.
- [9] ZUO Y, CUI J, DONG J, YU F. Effects of low frequency electromagnetic field on the as-cast microstructures and mechanical properties of superhigh strength aluminum alloy [J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 408: 176-181.
- [10] ZUO Y B, NAGAUMI H, CUI J Z. Study on the sump and temperature field during low frequency electromagnetic casting a superhigh strength Al-Zn-Mg-Cu alloy [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 197(1/3): 109-115.
- [11] HAO H, ZHANG X G, PARK J P, KIM H Y, JIN J Z. Twin-strand technology and microstructure analysis for the electromagnetic near net-shape casting of aluminum alloy [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 142(2): 526-531.
- [12] LI X, GUO Z, ZHAO X, WEI B, CHEN F, LI T. Continuous casting of copper tube billets under rotating electromagnetic field[J]. Materials Science and Engineering A, 2007, 460/461: 648-651.
- [13] YAN Z, LI X, CAO Z, ZHANG X, LI T. Grain refinement of horizontal continuous casting of the CuNi10Fe1Mn alloy hollow billets by rotating magnetic field (RMF) [J]. Materials Letters, 2008, 62(28): 4389-4392.
- [14] WILLERS B, ECKERT S, MICHEL U, HAASE I, ZOUHAR G. The columnar-to-equiaxed transition in Pb-Sn alloys affected by electromagnetically driven convection [J]. Materials Science and Engineering A, 2005, 402(1/2): 55-65.
- [15] GRIFFITHS W D, MCCARTNEY D G. The effect of electromagnetic stirring on macrostructure and macrosegregation in the aluminium alloy 7150 [J]. Materials Science and Engineering A, 1997, 222(2): 140-148.
- [16] DRAGNEVSKI K, MULLIS A M, WALKER D J, COCHRANE R F. Mechanical deformation of dendrites by fluid flow during the solidification of undercooled melts [J]. Acta Materialia, 2002, 50(14): 3743-3755.
- [17] PILLING J, HELLAWELL A. Mechanical deformation of dendrites by fluid flow [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1996, 27(1): 229-232.
- [18] FLEMINGS M C. Behavior of metal alloys in the semisolid state [J]. Metallurgical Transactions A, 1991, 22: 957-981.
- [19] HELLAWELL A, LIU S, LU S Z. Dendrite fragmentation and the effects of fluid flow in castings [J]. JOM, 1997, 49(3): 18-20.
- [20] ZHANG H, NAGAUMI H, CUI J. Coupled modeling of electromagnetic field, fluid flow, heat transfer and solidification during low frequency electromagnetic casting of 7XXX aluminum alloys: Part II. The effects of electromagnetic parameters on casting processes [J]. Materials Science and Engineering A, 2007, 448(1/2): 177-188.

(编辑 陈卫萍)