

T型导电结晶器电渣重熔空心钢锭过程的数值模拟

陈旭, 刘福斌, 姜周华, 李星
(东北大学材料与冶金学院, 辽宁沈阳 110819)

摘要: 基于新开发的电渣重熔空心钢锭技术, 建立了渣池和空心钢锭的三维准稳态数学模型. 利用商业软件 ANSYS 模拟并得到了非导电和导电结晶器工况下, 电渣重熔空心钢锭过程的电磁场、流场与温度场. 计算结果表明: 导电结晶器工况下, 渣池的电流密度和焦耳热最大值均出现在 T 型结晶器的导电段部分, 导电结晶器附近的熔池流动速度较快, 渣池的温度场更为均匀, 金属熔池形状更为浅平. 导电结晶器在交换电极时持续保持渣池和金属熔池温度, 能够避免渣池温度迅速下降而导致靠近结晶器壁的钢水迅速凝固而出现渣沟, 可大大提高钢锭的凝固质量和表面质量.

关键词: 导电结晶器; 电渣重熔; 空心钢锭; 电磁场; 流场; 温度场; 凝固

中图分类号: TF 744 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2015)06-0805-06

Numerical Simulation of Electroslag Remelting Process of Hollow Ingot with T-shape Current Supplying Mold

CHEN Xu, LIU Fu-bin, JIANG Zhou-hua, LI Xing

(School of Materials & Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: JIANG Zhou-hua, E-mail: jiangzh@smm.neu.edu.cn)

Abstract: A three dimensional quasi-steady state mathematical model of the slag bath and hollow ingot has been established based on the newly developed electroslag remelting (ESR) technology for hollow ingot manufacture. The electromagnetic, flow and temperature fields during the electroslag remelting hollow ingot process with and without the current supplying mold (CSM) have been simulated using commercial software ANSYS. Computational results showed that the maximum current density and joule heat of the slag bath were obtained in the conductive section of T-shaped CSM, where the fluid flow velocity was much faster and the temperature field of the slag bath was more uniform, and the metal pool shape was shallower. The CSM can keep slag bath and metal pool temperature constantly during the exchange of electrodes, which avoided the rapid solidification of liquid metal near the mold wall to generated slag ditches when the slag bath temperature drops rapidly. The solidification quality and surface quality of hollow ingots were thus greatly improved.

Key words: current supplying mold; electroslag remelting; hollow ingots; electromagnetic field; flow field; temperature field; solidification

随着核电、火电、水电、石化等领域的迅速发展,对筒形大锻件的尺寸要求越来越大、质量要求越来越高^[1].传统筒形大锻件都是采用普通实心钢锭进行空心锻件生产,冲孔工序会造成材料浪费,而且多工序的加热变形容易改变钢锭内部组织结构,影响产品质量;而直接采用空心钢锭作为

生产大型筒体的锻件,则可省去冲孔工序,减少锻造火次,降低锻造裂纹的产生,同时也解决了厚壁管穿孔、轧管难度大的技术问题^[2-4].

导电结晶器电渣重熔空心钢锭技术为大型厚壁管坯的生产提供了一种新的途径,是电渣冶金领域的前沿和热点技术^[5].采用 T 型导电结晶器

收稿日期: 2014-05-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51204041); 中央高校基本科研业务费国家项目培育种子基金资助项目(N130402016); 国家高技术研究发展重点计划项目(2012AA03A502); 辽宁省高校创新团队支持计划项目(LT20120008).

作者简介: 陈旭(1984-),女,辽宁抚顺人,东北大学博士研究生;姜周华(1963-),男,浙江萧山人,东北大学教授,博士生导师.

(CSM)的电渣重熔空心钢锭,整个体系的电流产生两个回路.由于外结晶器导电,可对渣池持续供电,特别在交换电极时外结晶器仍然持续对渣池供电加热,可大大避免由于熔渣温度骤降而导致电极交换的结合处产生渣沟等缺陷,从而保证了空心钢锭的内部质量和表面质量.

关于传统电渣重熔过程的数学模型,前人做了许多研究^[6-7],然而电渣重熔空心钢锭过程需要内外结晶器同时冷却、采用导电结晶器使其整个体系产生两个回路、自耗电电极布置等都不同于传统电渣重熔过程,导致所产生的电磁场、温度场与传统电渣重熔过程有很大的区别.本文借助有限元分析软件 ANSYS 对电渣重熔制备 $\phi 900/500$ mm 空心钢锭过程进行了数值模拟,得到电场、磁场、温度场以及流场的分布特征.对比分析了在采用导电和非导电结晶器工况下,体系各物理场的分布规律和钢锭凝固特征.

1 数学模型的建立

1.1 基本假设

1) 自耗电电极在一个较短时间段内与结晶器相对静止,反应过程为准稳态过程.

2) 渣池与金属熔池的界面为水平面.

3) 凝固过程中释放的潜热,以焓方法体现在传热方程中.

4) 在计算的温度范围内,炉渣的黏度随温度变化较大,其他物性参数随温度变化较小,对计算结果的影响也很小.

5) 金属熔池内的对流传热问题简化为热传导问题.

1.2 控制方程

1) 电磁场方程:

$$\nabla \times E = \frac{\partial B}{\partial t}, \quad (1)$$

$$\nabla \times H = J, \quad (2)$$

$$\nabla \cdot B = 0, \quad (3)$$

$$\nabla \cdot J = 0. \quad (4)$$

式中: E 为电场强度, $V \cdot m^{-1}$; B 为磁感应强度, T; H 为磁场强度, $A \cdot m^{-1}$; J 为电流密度, $A \cdot m^{-2}$; t 为时间, s.

2) 渣池流动方程:

$$\nabla \cdot v = 0, \quad (5)$$

$$\rho(v \cdot \nabla)v = -\nabla P + \nabla \cdot (\mu_{\text{eff}} \cdot \nabla v) + F, \quad (6)$$

$$F = J \times B + \rho[1 - \beta(T - T_0)]g. \quad (7)$$

式中: ρ 为熔体的密度, $kg \cdot m^{-3}$; v 为速度矢量,

$m \cdot s^{-1}$; P 为压力, Pa; μ_{eff} 为熔体的有效黏度, $Pa \cdot s$; β 为体积膨胀系数, K^{-1} ; g 为重力加速度, $m \cdot s^{-2}$; T 为熔体中的某一点的温度, K; T_0 为参考点温度, K; F 为体积力(包括电磁力和浮力), N.

3) 体系的传热方程:

$$\rho_i C_{pi}(V_i \nabla T) = \nabla \cdot K_i \nabla T + S_{T,i}. \quad (8)$$

式中: $i = e$ (电极), l (金属熔池), m (两相区), s (铸锭); V_i 为铸锭的生长速度, $m \cdot s^{-1}$; S_T 为内热源, $W \cdot m^{-3}$.

1.3 边界条件

在本模型的电磁场计算中,采用磁通量平行边界条件,电极端部和 T 型导电结晶器导电段耦合电压自由度,并加载电流;流场计算中,固/液界面为无滑移边界条件,采用壁面函数计算近壁区域的湍流动能及其耗散率;温度场计算中,电极/熔渣界面为金属液相线温度,不同位置分别采用 Dirichlet 边界条件和 Robin 边界条件.

2 几何模型和模型参数

本文选择 1Mn18Cr18N 护环钢为电渣重熔钢种,以 $CaF_2 - CaO - Al_2O_3 - SiO_2 - MgO$ 五元渣系进行数学模拟.模型中的主要参数见表 1.熔渣、钢锭的物性参数见表 2 和表 3^[8].

表 1 模型的主要参数
Table 1 Main parameters of the model

名称	设定值
电极半径/m	0.08
电极数量	10
空心钢锭外径/m	0.90
空心钢锭内径/m	0.50
渣池深度/m	0.20
电极插入深度/m	0.02
重熔电流/A	21 000

表 2 钢锭和熔渣的物理特性参数
Table 2 Characteristic parameters of hollow ingots and slags

名称	设定值
渣的密度/($kg \cdot m^{-3}$)	2 524(1 873K)
钢锭的密度/($kg \cdot m^{-3}$)	7 800
渣的电导率/($S \cdot m^{-1}$)	400
钢的电导率/($S \cdot m^{-1}$)	7.1×10^5
渣的比热容/($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)	1 255
钢的比热容/($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)	720
渣的热膨胀系数/ K^{-1}	2.0×10^{-4}
渣的热导率/($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	6
钢的热导率/($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	25
钢的液相线温度/K	1 649
钢的固相线温度/K	1 580

表 3 熔渣的黏度值
Table 3 Viscosities of slags

T/K	1 623	1 673	1 723	1 773	1 823
$\eta/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	0.036 9	0.022 5	0.020 2	0.018 0	0.001 78

3 模型验证

电渣重熔空心钢锭是一种全新的技术,可供参考的现场数据较少,本文以相同的模拟方法对 P91 钢种进行数值计算,将数值模拟得出的熔池深度与钢厂实际生产操作中得到的熔池深度进行比较,以检验电渣重熔空心钢锭数值模拟方法的正确性.表 4 为模型验证参数.

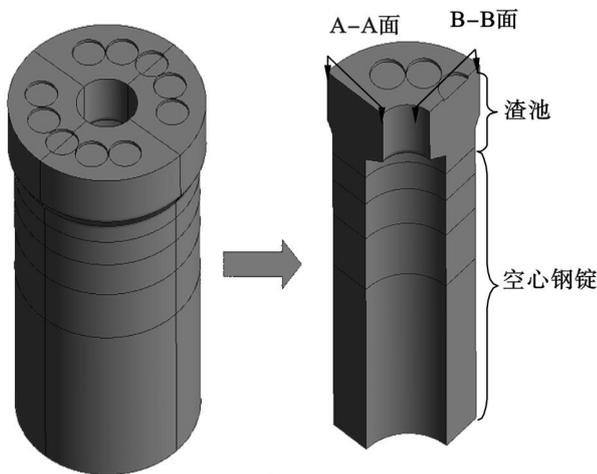


图 1 ESR 有限元模型及简化模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram and simplified model of ESR finite element method

表 4 模型验证参数
Table 4 Parameters of the model validation

重熔电压 /V	电极数	电极直径 /m	渣高 /m	插入深度 /m
66	10	0.16	0.12	0.01

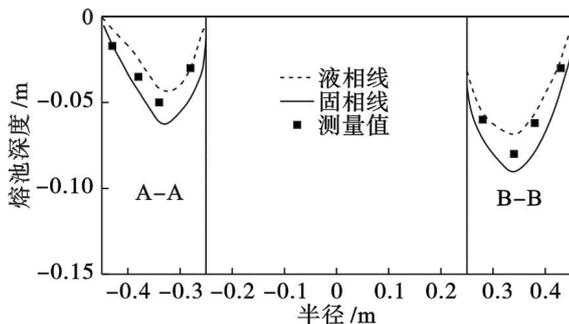


图 2 现场实测与数值模拟的金属熔池对比图

Fig. 2 Comparison of metal pools between observed values and numerical simulation values

图 2 是实测 P91 空心钢锭的金属熔池与模拟的金属熔池对比图,可以看出数值模拟得出的熔池深度与现场实测金属熔池深度基本吻合,从而验证了模拟方法的准确性.

4 结果与讨论

电渣重熔空心锭体系中,渣池的电流密度分布如图 3 所示.从图 3a 中可以看出渣池中电流密度分布特征,电极端部电流密度最大,此区域附近的渣池是自耗电极熔化的主要热源区.图 3b 表明最大电流密度出现在 T 型结晶器的导电段部分,这是由于导电段通电后,电流直接通过导电段进入渣池形成回路.同时,由于采用的是 T 型结晶器,当电流通过的横截面变小时,在 T 型台阶处电流密度大幅度增加,这使得高温区下移,易于形成良好的钢锭表面质量.

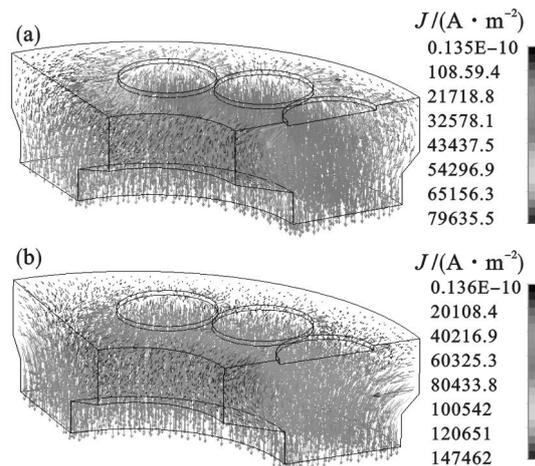


图 3 渣池电流密度分布

Fig. 3 Current density distribution

(a) —非导电结晶器; (b) —导电结晶器.

渣池的磁感应强度分布如图 4 所示.在靠近

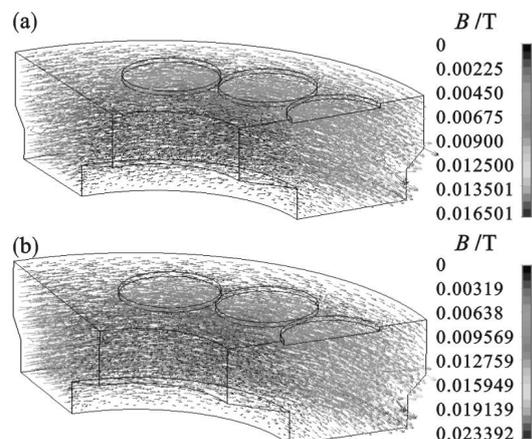


图 4 渣池电磁感应强度分布

Fig. 4 Magnetic intensity distribution

(a) —非导电结晶器; (b) —导电结晶器.

内结晶器侧磁感应强度较小,而越靠近外结晶器侧磁感应强度逐渐增大,同时轴向电流产生的磁感应强度方向与电流密度方向符合右手定律。

导电结晶器工况下(图 4b),渣池的磁感应强度最大值在 T 型结晶器的 T 型台阶处,比非导电结晶器工况下渣池的磁感应强度大 $0.7 \times 10^{-2} T$,说明电流通过导电结晶器进入渣池,在渣池与导电段的接触处产生了较大的磁感应强度。

图 5 为渣池内电磁力分布,电磁力的方向与电流密度和磁感应强度的方向符合左手定律。由于采用 T 型结晶器的结构,电磁力垂直于两侧的 T 型凸台,这也就说明电磁力有一个轴向分量和一个径向分量,径向分量使渣池的熔渣向轴线方向流动,而轴向分量使熔渣流向金属熔池流动。采用导电结晶器工况下,渣池的最大电磁力要远远大于非导电结晶器工况下渣池的最大电磁力,这说明采用导电结晶器可增加对渣池的电磁搅拌作用,加速熔渣的流动,使渣池温度更为均匀。

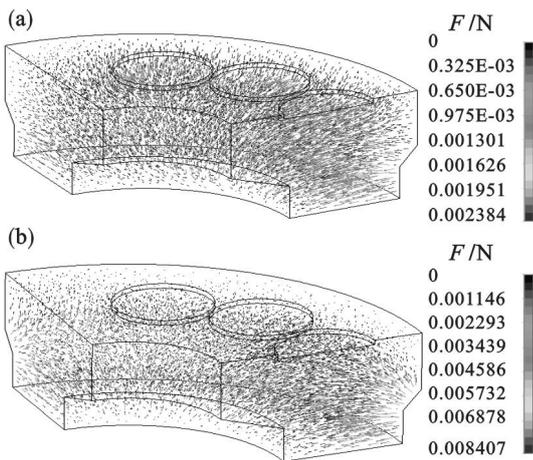


图 5 渣池的电磁力分布
Fig. 5 Electromagnetic force distribution
(a)—非导电结晶器; (b)—导电结晶器。

图 6 为渣池焦耳热的分布规律,采用非导电结晶器工况下渣池的最大焦耳热出现在电极的端部,最大值为 $0.46 \times 10^8 W/m^3$;而采用导电结晶器工况下渣池的最大焦耳热出现在 T 型结晶器的导电段部分,最大值为 $1.06 \times 10^8 W/m^3$ 。

从图 7 可以看出,渣池内部均出现了两个漩涡,一个在靠近内结晶器和电极下方区域,熔渣沿逆时针方向旋转;一个在外结晶器和电极下方区域,熔渣沿顺时针方向旋转。这是由于电渣重熔渣池内速度场分布由电磁力场和浮力场共同影响,电磁力场促使熔渣趋于逆时针方向旋转,而浮力场促使熔渣趋于顺时针方向旋转。采用导电结晶器后使电极正下方和导电段附近渣池之间的温度

场更加均匀,热梯度变小,因此产生的热浮力也减弱。此时,导电段附近熔池为电磁力场占主导作用,熔池受到较大的电磁力搅拌的作用,因而熔渣流动的最大速度在靠近外结晶器壁的导电段部分。

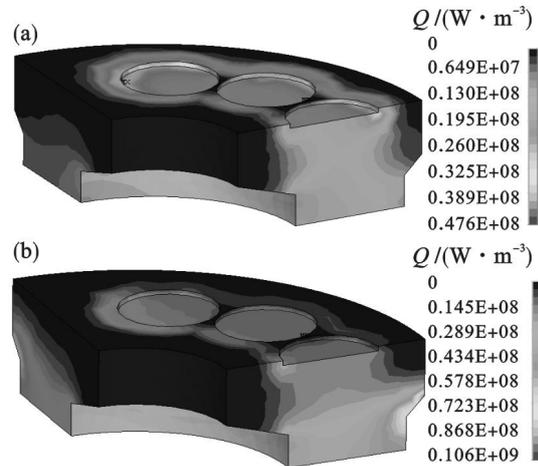


图 6 渣池的焦耳热分布
Fig. 6 Joule heat distribution
(a)—非导电结晶器; (b)—导电结晶器。

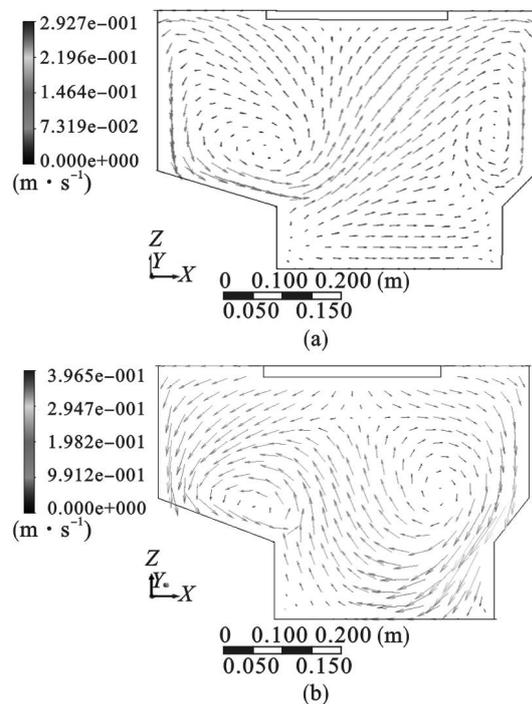


图 7 渣池的速度场分布
Fig. 7 Calculated velocity distribution
(a)—非导电结晶器; (b)—导电结晶器。

渣池的温度场如图 8 所示,最高温度均分布在电极下方,然而采用导电结晶器情况下渣池的高温区明显增大,这说明采用导电结晶器的电渣重熔可以控制渣池内的电流分配,使电极至结晶器导电段的电流密度增大,导致发热量增加。

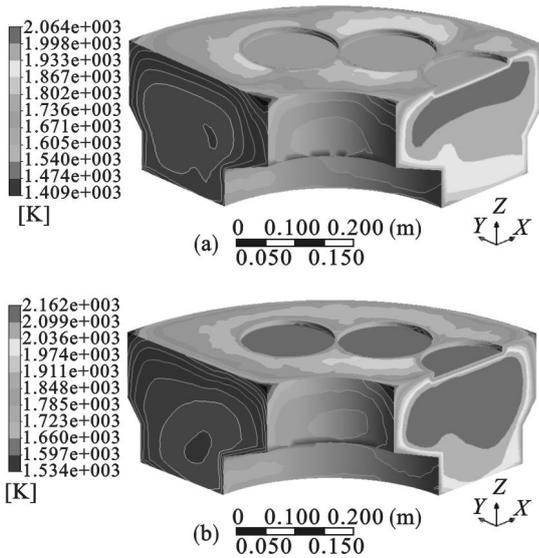


图 8 渣池的温度场分布
Fig. 8 Temperature distribution

(a) —非导电结晶器；(b) —导电结晶器。

图 9 为金属熔池形貌，金属熔池呈现出抛物线形状，越靠近两侧的结晶器壁，金属熔池深度越浅，固 - 液两相区的宽度也越来越窄，这是由于空心钢锭受到两侧内外结晶器同时的冷却作用，所以越靠近两侧的结晶器壁，钢锭凝固越快。

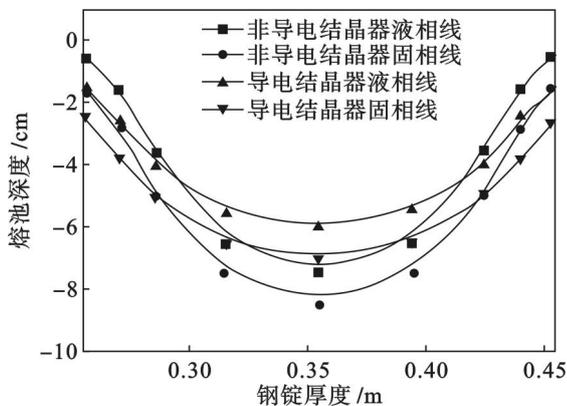


图 9 金属熔池深度
Fig. 9 Depth of the metal pool

采用导电结晶器工况下，金属熔池最大深度为 6 cm；非导电结晶器工况下，金属熔池最大深度为 7.5 cm。采用导电结晶器可明显地减小金属熔池的中部和两侧的温度差，金属熔池同一水平截面的温度场更加均匀，因此金属熔池形状较非导电结晶器的金属熔池形状更为浅平。

本研究的模型为轴对称模型，如图 1 所示，因此截取两个不同的截面 A - A 和 B - B 面的金属熔池形状进行了对比。由于 A - A 面上方没有自耗电电极，而 B - B 面上方与自耗电电极直接接触，渣池温度相对较高，导致 B - B 面上的金属熔池更

深；同时采用导电结晶器工况下，渣池的 A - A 面和 B - B 面的金属熔池形状均比非导电结晶器工况下的金属熔池形状更加浅平，如图 10 所示。这也证实了采用导电结晶器均可使空心钢锭各个截面金属熔池形状更加浅平，对提高钢锭的凝固质量和表面质量非常有利。

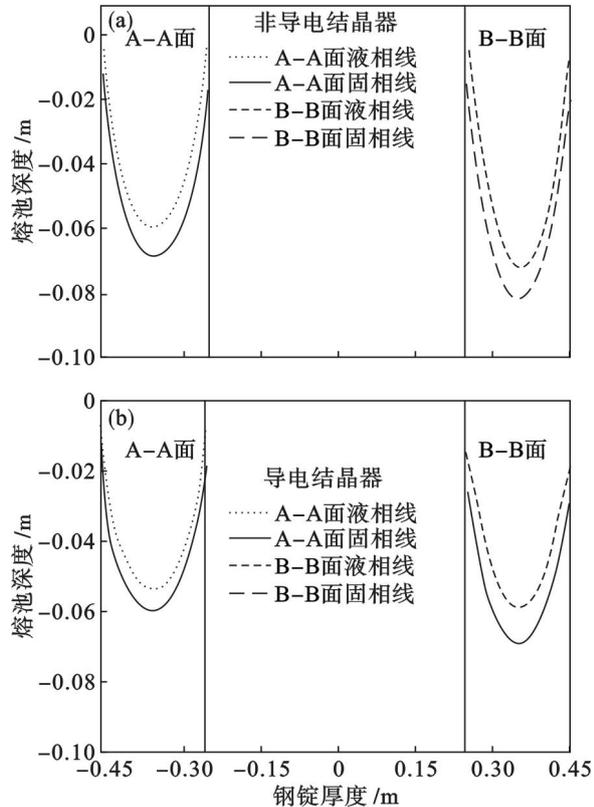


图 10 金属熔池形状
Fig. 10 Depth of the metal pool

(a) —非导电结晶器；(b) —导电结晶器。

5 结 论

1) 与传统的非导电结晶器电渣重熔相比，采用导电结晶器时其渣池的电磁场、流场和温度场的分布规律，以及空心锭的金属熔池形状有明显区别。

2) 采用导电结晶器的渣池的电流密度和最大焦耳热最大值出现在 T 型结晶器的导电段，使得高温区下移，易于形成良好的钢锭表面质量。

3) 采用导电结晶器使电极正下方和导电段附近的渣池之间的温度场更加均匀，热梯度变小，因此产生的热浮力也减弱。导电段附近的熔池由于受到较大的电磁力搅拌作用，因此在靠近外结晶器壁的导电段附近处的熔渣流动速度最快。

4) 导电结晶器的金属熔池形状更为浅平。在交换电极时，导电结晶器仍可持续保持渣温和金属熔池温度，能够避免靠近结晶器壁的钢水迅速

凝固,提高钢锭的结晶质量和表面质量.

参考文献:

- [1] 张向琨,赵长春,刘庄.空心钢锭技术文献综述[J].大型铸锻件,2000,88(2):44-47.
(Zhang Xiang-kun, Zhao Chang-chun, Liu Zhuang, et al. A summary of literature on techniques of hollow ingot [J]. *Heavy Castings and Forgings*, 2000, 88(2):44-47.)
- [2] Hernandez Morales B, Mitchell A. Review of mathematical models of fluid flow, heat transfer, and mass transfer in electrosag remelting process[J]. *Ironmaking & Steelmaking*, 1999, 6:423-438.
- [3] Girardin G. Hollow ingots: thirty years of use to control segregation and quality for nuclear and petrochemical large shells[C]//Proceedings of IFM-18. Pittsburgh, 2011:170-174.
- [4] Fedorovskii B, Medovar L, Stovpchenko G, et al. ESR of

hollow ingots; new approaches to a traditional problem[C]//Proceedings of the 2011 Liquid Metal Processing & Casting. Nancy, 2011:97-107.

- [5] Chen X, Jiang Z H, Medovar L, et al. Hot test and simulation of ESR hollow ingots formation in current supplying mould with electrodes change[C]//Proceedings of the 2013 Liquid Metal Processing & Casting. Austin, 2013:37-42.
- [6] Choudly M, Szekely J. Modelling of fluid flow and heat transfer in industrial-scale ESR system [J]. *Ironmaking & Steelmaking*, 1981, 4(5):225-232.
- [7] Dong Y W, Jiang Z H, Liu H, et al. Simulation of multi-electrode ESR process for manufacturing large ingot[J]. *ISIJ International*, 2012, 52(12):2226-2234.
- [8] Liu F B, Zang X M, Jiang Z H, et al. Comprehensive model for a slag bath in electrosag remelting process with a current-conductive mould [J]. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 2012, 19(4):303-311.

(上接第 799 页)

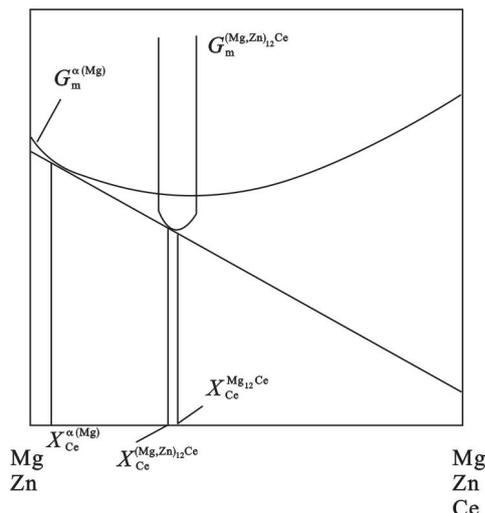


图 4 $\alpha(\text{Mg})$ 与 $(\text{Mg}, \text{Zn})_{12}\text{Ce}$ 的相平衡原理示意图
Fig. 4 Phase equilibrium principle between $\alpha(\text{Mg})$ and $(\text{Mg}, \text{Zn})_{12}\text{Ce}$

3 结 论

1) 300 °C 时, Mg - Zn - Ce 系富镁角存在 Mg_{12}Ce 的二元置换式固溶体: $(\text{Mg}, \text{Zn})_{12}\text{Ce}$. ($x(\text{Zn}) = 0 \sim 7.3\%$).

2) 300 °C 时, Mg - Zn - Ce 系富镁角存在一个三元线性化合物相 τ 相, 其化学表达式为 $(\text{Mg}, \text{Zn})_{11}\text{Ce}$. 该相中的 Zn 元素的成分范围为 8.5% ~ 43.5% (原子分数), 其晶体结构为 C 底心正交晶格.

3) 300 °C 时, $(\text{Mg}, \text{Zn})_{12}\text{Ce}$ 与 τ 相分别与 $\alpha(\text{Mg})$ 形成具有一定范围的两相区, 并且在此两

区之间存在 $(\text{Mg}, \text{Zn})_{12}\text{Ce} + \tau + \alpha(\text{Mg})$ 的三相区.

参考文献:

- [1] Nayeb-Hashemi A A, Clark J B. The Ce-Mg (cerium-magnesium) system [J]. *Bulletin of Alloy Phase Diagrams*, 1988, 9(2):162-172.
- [2] Kevorkov D, Pegguleryuz M. Experimental study of the Ce-Mg-Zn phase diagram at 350 °C via diffusion couple techniques [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2009, 478(1/2):427-436.
- [3] Luo A A, Mishra R K, Sachdev A K. High-ductility magnesium-zinc-cerium extrusion alloys [J]. *Scripta Materialia*, 2011, 64(5):410-413.
- [4] Park S H, Yu H, Bae J H, et al. Microstructural evolution of indirect-extruded ZK60 alloy by adding Ce [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2012, 545:139-143.
- [5] Chino Y, Huang X S, Suzuki K, et al. Microstructure, texture and mechanical properties of Mg-Zn-Ce alloy extruded at different temperatures [J]. *Materials Transactions*, 2001, 52(6):1104-1107.
- [6] Melnik E V, Kostina M F, Yarmlyuk Y P, et al. Study of the magnesium-zinc-cerium and magnesium-zinc-calcium ternary systems (in Russian) [M]. Razrab: Magnievyykh Splavov, 1978.
- [7] Drits M E, Drozdova E I, Korolkova I G, et al. Investigation of polythermal sections of the Mg-Zn-Ce system in the magnesium-rich region [J]. *Russian Metallurgy*, 1989, 2:195-197.
- [8] Pavlyuk V, Marciniak B, Ró z ycka-Sokołowska E. The isothermal section of the phase diagram of Ce-Mg-Zn ternary system at 470 K [J]. *Intermetallics*, 2012, 20:8-15.
- [9] Chiu C N, Grobne J, Kozlov A, et al. Experimental study and thermodynamic assessment of ternary Mg-Zn-Ce phase relations focused on Mg-rich alloys [J]. *Intermetallics*, 2010, 18(4):399-405.
- [10] Zhou T, Xia H, Chen Z H. Effect of Ce on microstructures and mechanical properties of rapidly solidified Mg-Zn alloy [J]. *Materials Science and Technology*, 2011, 27(7):1198-1205.
- [11] Huang M L, Li H X, Ding H, et al. Intermetallics and phase relations of Mg-Zn-Ce alloys at 400 °C [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, 22(3):539-545.