



结晶器旋转数值模拟及对高速钢电渣锭碳化物的影响

邓南阳 施晓芳 陈佳顺 常凯华 于雯春 王建军 常立忠

Numerical simulation of mold rotation and its effect on carbides in HSS ESR ingot

DENG Nan-yang, SHI Xiao-fang, CHEN Jia-shun, CHANG Kai-hua, YU Wen-chun, WANG Jian-jun, CHANG Li-zhong

引用本文:

邓南阳, 施晓芳, 陈佳顺, 常凯华, 于雯春, 王建军, 常立忠. 结晶器旋转数值模拟及对高速钢电渣锭碳化物的影响[J]. *工程科学学报*, 2020, 42(4): 516–526. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2019.07.07.001

DENG Nan-yang, SHI Xiao-fang, CHEN Jia-shun, CHANG Kai-hua, YU Wen-chun, WANG Jian-jun, CHANG Li-zhong. Numerical simulation of mold rotation and its effect on carbides in HSS ESR ingot[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2020, 42(4): 516–526. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2019.07.07.001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.07.07.001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

Al对淬回火H11钢力学性能和碳化物的影响

Influence of Al on mechanical properties and carbides of quenched and tempered H11 steel

工程科学学报. 2018, 40(2): 208 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2018.02.011>

浸入式水口对结晶器钢水流动与液面波动的影响

Effect of SEN on fluid flow and surface fluctuation in a continuous casting slab mold

工程科学学报. 2018, 40(6): 697 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2018.06.007>

基于密度聚类和动态时间弯曲的结晶器黏结漏钢预报方法的开发

Development of prediction method for mold sticking breakout based on density-based spatial clustering of applications with noise and dynamic time warping

工程科学学报. 2020, 42(3): 348 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.04.02.004>

钒对高铁制动盘钢中碳化物析出及力学性能的影响

Effect of V on carbide precipitation behavior and mechanical properties of brake disc steel for high-speed trains

工程科学学报. 2018, 40(1): 68 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2018.01.009>

铝电解槽废阴极炭块电热耦合处理过程数值模拟

Numerical simulation of electrothermal coupling process for spent cathode carbon block from aluminum electrolysis cell

工程科学学报. 优先发表 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.06.10.002>

结晶器旋转数值模拟及对高速钢电渣锭碳化物的影响

邓南阳^{1,2)}, 施晓芳¹⁾, 陈佳顺¹⁾, 常凯华¹⁾, 于雯春¹⁾, 王建军¹⁾, 常立忠¹⁾✉

1) 安徽工业大学冶金工程学院, 马鞍山 243002 2) 马鞍山钢铁股份有限公司, 马鞍山 243000

✉通信作者, E-mail: clz1997@163.com

摘 要 为了改善 M2 高速钢中的碳化物分布, 通过数值模拟详细分析了结晶器旋转对 M2 高速钢电渣重熔过程温度场、金属熔池形状的影响, 并进一步通过实验室双极串联结晶器旋转电渣炉研究了旋转速率对 M2 高速钢电渣重熔过程的影响. 采用扫描电镜观察并分析了结晶器旋转对电渣锭中碳化物形貌、分布的影响; 采用小样电解萃取实验, 分析了结晶器旋转速率对碳化物组成的影响. 结果发现, 随着结晶器旋转速率的增加, 渣池的高温区从芯部向边部迁移, 温度分布更加均匀; 金属熔池的深度变浅, 两相区的宽度收窄, 从而导致局部凝固时间降低、二次枝晶间距减小. 与此相对应, 随着结晶器旋转速率的增加, M2 电渣锭的渣皮更薄、更加均匀, 结晶器对电渣锭的冷却强度更大, 碳化物网格开始破碎、变薄, 碳化物由片状改变为细小的棒状. X 射线衍射分析表明, 不论结晶器是否旋转, 碳化物的类型始终不变, 由 M_2C 、MC 和 M_6C 组成, 但是随旋转速率增加 M_2C 含量增加, MC 和 M_6C 含量降低. 碳化物组织得以改善的主要原因在于, 结晶器旋转导致金属熔池深度降低、两相区宽度收窄, 改善了凝固条件, 减轻了元素偏析.

关键词 电渣重熔; 高速钢; 碳化物; 结晶器; 数值模拟

分类号 TF744

Numerical simulation of mold rotation and its effect on carbides in HSS ESR ingot

DENG Nan-yang^{1,2)}, SHI Xiao-fang¹⁾, CHEN Jia-shun¹⁾, CHANG Kai-hua¹⁾, YU Wen-chun¹⁾, WANG Jian-jun¹⁾, CHANG Li-zhong¹⁾✉

1) School of Metallurgy Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243002, China

2) Maanshan Iron & Steel Co., Ltd., Maanshan 243000, China

✉ Corresponding author, E-mail: clz1997@163.com

ABSTRACT High-speed steel contains a large amount of carbides, the shape and distribution of which have an important influence on its quality. To improve the distribution of carbides in M2 high-speed steel, the temperature field and the shape of the metal pool during the mold-rotation process were investigated in detail using a numerical simulation. Moreover, the effect of the mold-rotation speed on the electroslag remelting process was investigated using a rotating bifilar electroslag remelting furnace under laboratory conditions. The morphology and distribution of carbides in an ESR ingot were observed using an SEM, and the composition of carbides was analyzed through an electrolytic extraction experiment. Results show that with increase in mold rotation speed, the high-temperature zone of the slag pool moves from the core to the edge. Moreover, the temperature distribution becomes uniform. The depth of the metal pool becomes shallow, and the thickness of the two-phase region decreases, which results in a short local solidification time and small secondary dendrite spacing. Correspondingly, with the increase in the mold rotation speed, the slag skin of ESR ingot becomes thin and more uniform than earlier. The cooling intensity of the mold on the ESR ingot is high, and the carbide network begins to break and become thin. The morphology of carbides changes from flake to fine rod. XRD analysis determines whether the mold rotates or not, carbides always comprise M_2C , MC, and M_6C . However, the content of M_2C increases and the contents of MC and M_6C decrease with

收稿日期: 2019–07–07

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51574001, 51774003); 钢铁冶金新技术国家重点实验室开放基金资助项目 (KF19-05); 安徽省高校优秀青年人才支持计划资助项目 (gxyqZD2017034); 安徽工业大学创新训练项目 (201910360013)

the increase in mold-rotation speed. The main reason for the improvement in the carbide structure is that the mold rotation decreases the metal pool depth and two-phase zone thickness, which improves the solidification conditions and reduces the element segregation.

KEY WORDS electroslag remelting; high speed steel; carbide; mold; numerical simulation

高速工具钢合金含量较高, 两相区温差较大, 凝固过程十分复杂, 元素偏析严重, 导致铸态组织中易产生不均匀和尺寸粗大的碳化物, 直接影响高速工具钢的性能。为了消除碳化物对高速钢性能的不利影响, 常常需要进行多次热变形。即使如此, 有些大尺寸的碳化物在多次热变形后仍不能完全消除, 导致高速工具钢的耐磨性、红硬性、韧性等性能大幅度地下降, 严重影响使用寿命。

为了改善高速钢的凝固质量, 细化碳化物组织, 冶金工作者进行了大量的基础研究和技术开发工作。(1)提高冷却速率^[1-2]。最典型的应用实例之一就是电渣重熔^[3-4]。由于重熔过程较高的凝固速度, 可明显改善钢的凝固质量, 但是随着电渣锭直径的增加, 芯部冷却减弱, 仍出现大块的、不均匀的碳化物。因此, 电渣重熔高速钢对电渣锭的直径有严格限制。(2)粉末冶金^[5-6]。能够细化晶粒, 均匀组织, 可从根本上解决偏析问题。但是粉末冶金工艺过程过于繁琐、生产流程长, 成本高, 生产效率低。(3)在高速钢母液中加入变质剂, 如 Mg, Re 等元素^[7-9]。Mg 能够改善钢的质量, 而且微量的 Mg 就能达到效果, 对碳化物的控制也有益处, 但由于镁的蒸气压很高, 在炼钢温度下极易气化, 造成镁的收得率很难得到保证; Re 也能够改善高速钢凝固质量, 但是其改善凝固质量的机理没有统一的说法。特别是当高速钢经过电渣重熔后, 钢中的镁或稀土很难得到保证。因此, 低成本的有效提高高速钢凝固质量成了众多冶金工作者共同目标。

基于以上的问题, 本文设计了结晶器可旋转的双极串联电渣重熔装置, 在前期的研究基础上^[10-11], 以 M2 高速钢为研究对象, 通过数值模拟详细研究了结晶器旋转过程的温度场变化, 并通过热态高温实验研究结晶器旋转速率对碳化物分布、形态、组成的影响。

1 结晶器旋转过程数值模拟

1.1 模型的简化与假设

(1)在电渣重熔过程中自耗电电极插入深度始终不变且自耗电电极之间的距离也始终保持不变;

(2)在电渣重熔过程中渣液面始终保持水平不变;

(3)钢的导热率、比热容和黏度是与温度相关的函数, 其余的物性参数均为常数;

(4)渣的导热率和电导率也是与温度有关的函数, 其余物性参数皆为常数。

1.2 模型的控制方程

(1)渣池电场-焦耳热模型^[12]。

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial r} \quad (1)$$

式中: φ 为电位, V; t 为时间, s; r 为柱坐标半径, m; z 为柱坐标高度, m。

渣池通电过程产生的焦耳热 Q 可以描述为:

$$Q = \vec{E} \vec{J} \quad (2)$$

式中: Q 为发热密度, $\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$; $\vec{E}$ 为渣池内的电场强度, $\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$; $\vec{J}$ 为渣池中的电流密度, $\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$ 。可以分别表示成:

$$\vec{E} = \frac{\partial \varphi}{\partial r} \vec{e}_r + \frac{\partial \varphi}{\partial z} \vec{e}_z \quad (3)$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} = \sigma \left(\frac{\partial \varphi}{\partial r} \vec{e}_r + \frac{\partial \varphi}{\partial z} \vec{e}_z \right) \quad (4)$$

式中: $\vec{e}_r$ 和 $\vec{e}_z$ 分别代表径向和轴向的电场的单位矢量, $\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$; σ 为渣液电导率, $\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

将以上(3)和(4)代入式(2), 可以得到渣池发热密度方程:

$$Q = \sigma \left[\left(\frac{\partial \varphi}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)^2 \right] \quad (5)$$

(2)渣池连续性方程。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{u}) = 0 \quad (6)$$

式中: ρ 为密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; $\vec{u}$ 为速度矢量, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; t 为时间, s。

(3)渣池动量方程。

$$\left[\frac{\partial(\rho \vec{u})}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{u} \times \vec{u}) \right] = -\nabla p + \nabla(\mu_{\text{eff}} \nabla \vec{u}) + \vec{F}_b + \vec{F}_p + \vec{F}_1 \quad (7)$$

$$\vec{u}_1 = \vec{\omega} R \quad (8)$$

式中: $\vec{F}_b$, $\vec{F}_p$, $\vec{F}_1$ 分别为浮力, 两相区阻力和离心力, N; p 为压力, N; ρ 为密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; $\vec{u}$ 为速度矢量, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; μ_{eff} 为有效黏度, $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; $\vec{u}_1$ 为结晶器的线速度, $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; $\vec{\omega}$ 为结晶器的角速度, $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$; R 为结晶器半径, m。

(4)VOF 多相流方程^[13]。

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \vec{u}) = 0 \quad (9)$$

式中: α 为熔渣体积分数; t 为时间, s; $\vec{u}$ 为速度矢量, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

(5)凝固传热模型.

$$C_{pi}\rho\frac{\partial T}{\partial t}=k_i\left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\cdot\frac{\partial T}{\partial r}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)+S_i\tag{10}$$

式中: k_i 为导热系数, $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$; C_{pi} 为比热容, $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$; ρ 为密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; T 为温度, K; t 为时间, s; S_i 为内热源, J; r 为柱坐标半径, m; z 为柱坐标高度, m.

1.3 计算所需的相关参数

表 1 为计算所需要的相关参数.

1.4 计算结果与分析

(1)双极串联结晶器旋转过程渣池焦耳热的分布.

表 1 计算所需相关参数

Table 1 Relevant parameters required for calculation	
Parameters	Value
Thickness of slag pool/mm	40
Electrode diameter/mm	28
Electrode gap/mm	20
Electrode insertion depth/mm	15
Mold diameter/mm	96
Voltage/V	34
Mold-rotation speed / (r·min ⁻¹)	0, 6, 13, 19

图 1 为不同转速下渣池的焦耳热分布. 无论结晶器是否旋转, 渣池内部的焦耳热分布规律是

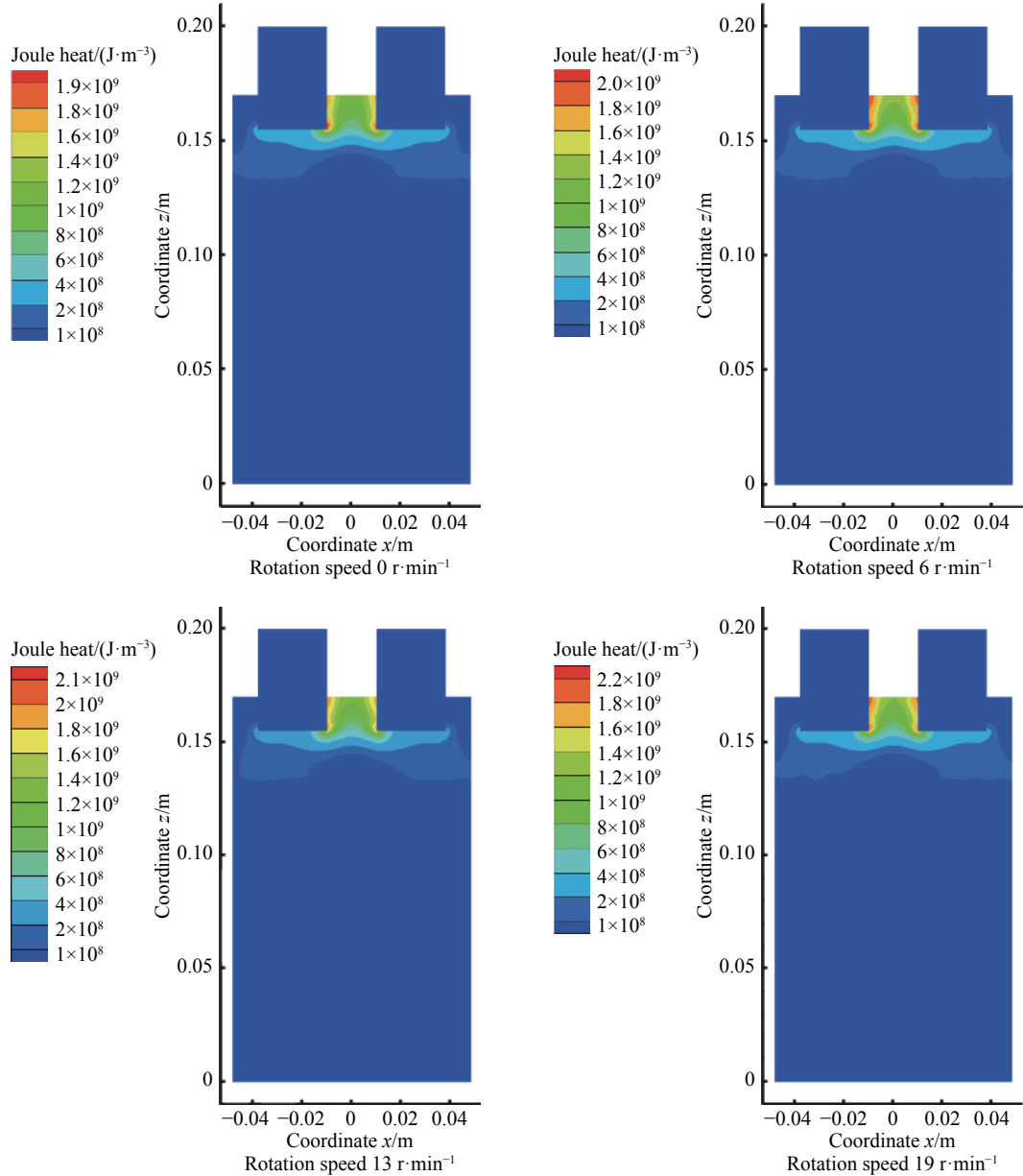


图 1 不同转速下渣池的焦耳热分布

Fig.1 Joule heat distribution of slag pool with different mold-rotation speeds

一致的, 而且为对称分布。焦耳热的最大值都存在于自耗电极之间且靠近电极一侧的下部和上部, 这与文献中的表述一致^[13-14]。由于电渣锭电导率较高, 因此电渣锭当中的焦耳热要比渣中的焦耳热小一个数量级。电渣重熔过程中, 电流优先选择“路径”最短的线路(即闭合回路中电阻最小的回路)。双极串联过程中, 这条最短“路径”就是电流从电极一侧通过两电极中间的熔渣回到另一电极。由于熔渣的电导率要远远低于钢的电导率, 因而焦耳热最大值分布在两极之间。

(2) 双极串联结晶器旋转过程渣池温度场/流场的分布。

图2为渣池表面的流场和温度场分布。当结晶器静止时, 几乎所有的高温区集中在两根自耗电极之间, 呈矩形分布; 当结晶器转速为 $6 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, 高温虽然还是在自耗电极的中间, 但是在结晶器旋转的作用下, 已有部分高温区已经不在电极之间, 向外发散, 而且高温区的形状开始发生改变。随着结晶器转速进一步加大至 13 和 $19 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 高温区向外发散的面积更大, 同时最高温度也降

低了。渣池的运动能够将温度较低的渣带入至高温区, 被加热以后又被带出。由于渣的电导率、导热系数与温度有关, 渣在高温区(电流密度最大的区域)的流入与流出, 导致了高温区电导率的变化, 因而, 在不同转速下温度最大数值是不相等的。

图3为渣/金界面的温度场和流场分布图。可以看出, 结晶器静止时, 渣/金截面的高温区在两个自耗电极的正下方, 这与单极电渣重熔不同(高温区在渣/金界面的中心), 高温区的面积较小, 温度分布不均匀, 近边缘(沿 x 轴方向)与远边缘(沿 y 轴方向)的温差较大, 中心温度较低, 渣/金界面的流动较小且做无规则的流动; 当结晶器转速为 $6 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, 高温区依然在两个自耗电极正下方, 与 $0 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 不同的是高温区变大, 中心的温度也升高了, 边缘与边缘之间的温差减小, 渣/金的流动变大并且开始作环形流动; 结晶器转速达到 $13 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, 高温区的面积进一步增大, 渣/金界面环形流动加强, 高温区的位置发生了改变, 开始往边缘移动, 高温区与边缘还有一定的距离, 边缘与边缘之间的温差得到进一步减小; 当结晶器的转速为

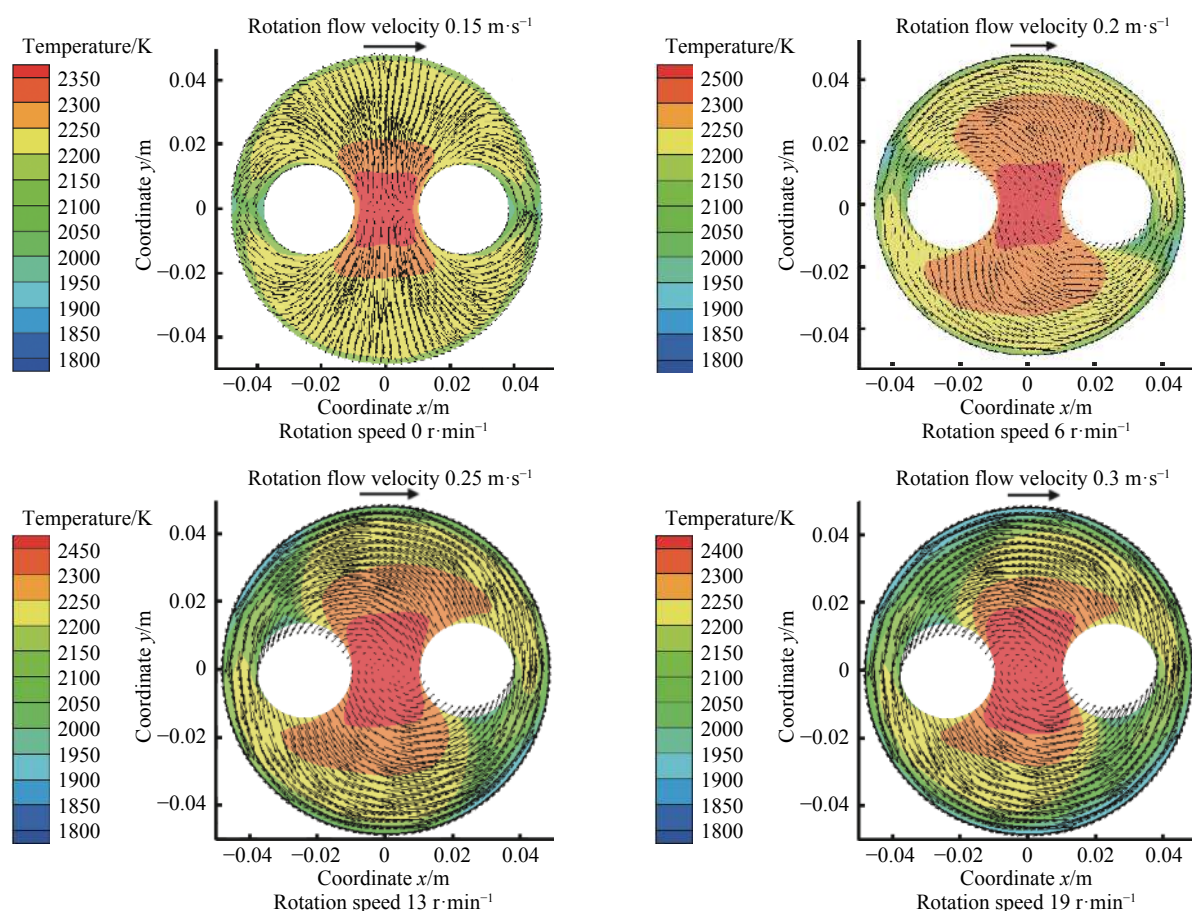


图2 渣池表面的流场和温度场随结晶器旋转的变化

Fig.2 Variations of the flow and temperature fields on the slag pool surface with different mold-rotation speeds

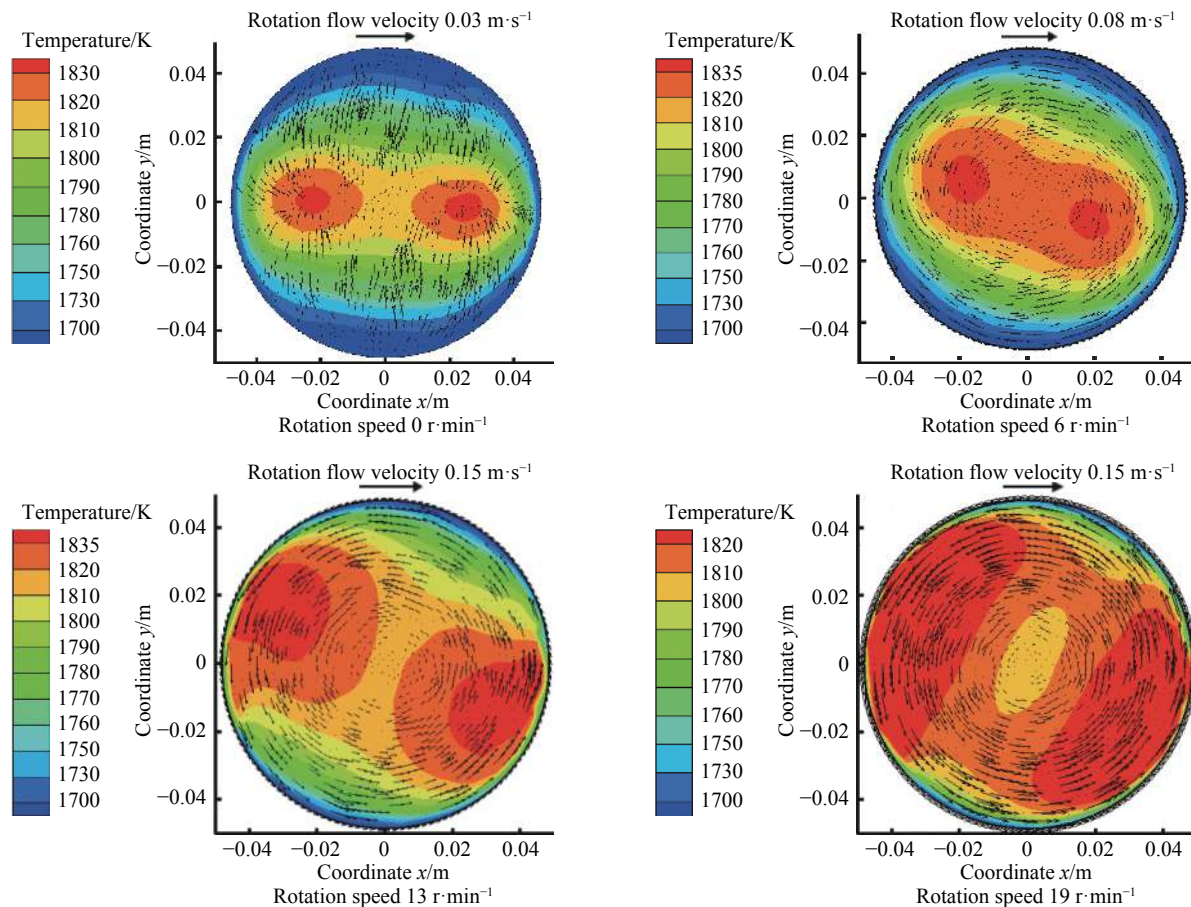


图3 渣-金界面处的流场和温度场随结晶器旋转的变化

Fig.3 Variations of the flow and temperature fields on the slag/metal-pool interface with different mold-rotation speeds

19 r·min⁻¹ 时, 高温区的面积达到了最大值, 高温区移动到了结晶器的边缘, 渣/金截面的温差进一步减小。

(3) 金属熔池温度场的变化。

图4为电渣重熔过程电渣锭/渣池的纵向温度场分布。根据图4, 得出了M2高速钢固/液相线的位置, 如图5所示。

从图4、图5可以看出, 结晶器转速越大, 金属熔池越浅且平, 两相区的厚度也减小。与结晶器静止状态相比(0 r·min⁻¹), 结晶器旋转时, 金属熔池深度分别降低了10.54%(19 r·min⁻¹), 8.81%(13 r·min⁻¹)和7.38%(6 r·min⁻¹); 两相区的厚度分别减小了1.05%(19 r·min⁻¹), 0.94%(13 r·min⁻¹)和0.03%(6 r·min⁻¹)。

2 结晶器旋转热态电渣重熔实验

2.1 实验

(1) 实验设备及材料。

实验设备为结晶器旋转双极串联电渣重熔炉。实验材料为M2高速工具钢。

(2) 实验过程。

① 重熔启动: 实验采用热启动的方式启动。首先将CaF₂和Al₂O₃混匀, 然后用石墨坩埚盛好, 放入硅钼棒高温炉中熔化。当温度达到1650℃时, 迅速取出倒入结晶器中, 重熔开始。

② 正常重熔: 重熔电压、电流分别设定为34 V, 1000 A。当重熔过程稳定以后, 使结晶器慢慢转动至设定转速。实验过程设定四个转速: 0, 6, 13和19 r·min⁻¹。

③ 重熔结束: 当重熔锭达到预定高度时, 缓慢降低结晶器转速至零, 断电。当渣冒完全凝固后, 脱模, 迅速将电渣锭送入退火炉中进行去应力退火, 退火温度710℃, 保温两个小时后, 随炉冷却至室温。

(3) 检验分析。

电渣锭取样位置如图6所示。

① 碳化物三维形貌分析。采用H₂O₂+HF腐蚀液, 在75℃下腐蚀2~3 s即可。然后采用扫描电镜-能谱进行检测分析。

② 碳化物的物相分析。委托国家钢铁材料测试中心进行检测。首先对M2钢进行电解萃取, 电解条件为: 1%四甲基氯化铵+10%乙酰丙酮甲醇溶液, 电流密度为0.04~0.06 A·cm⁻², 温度控制在

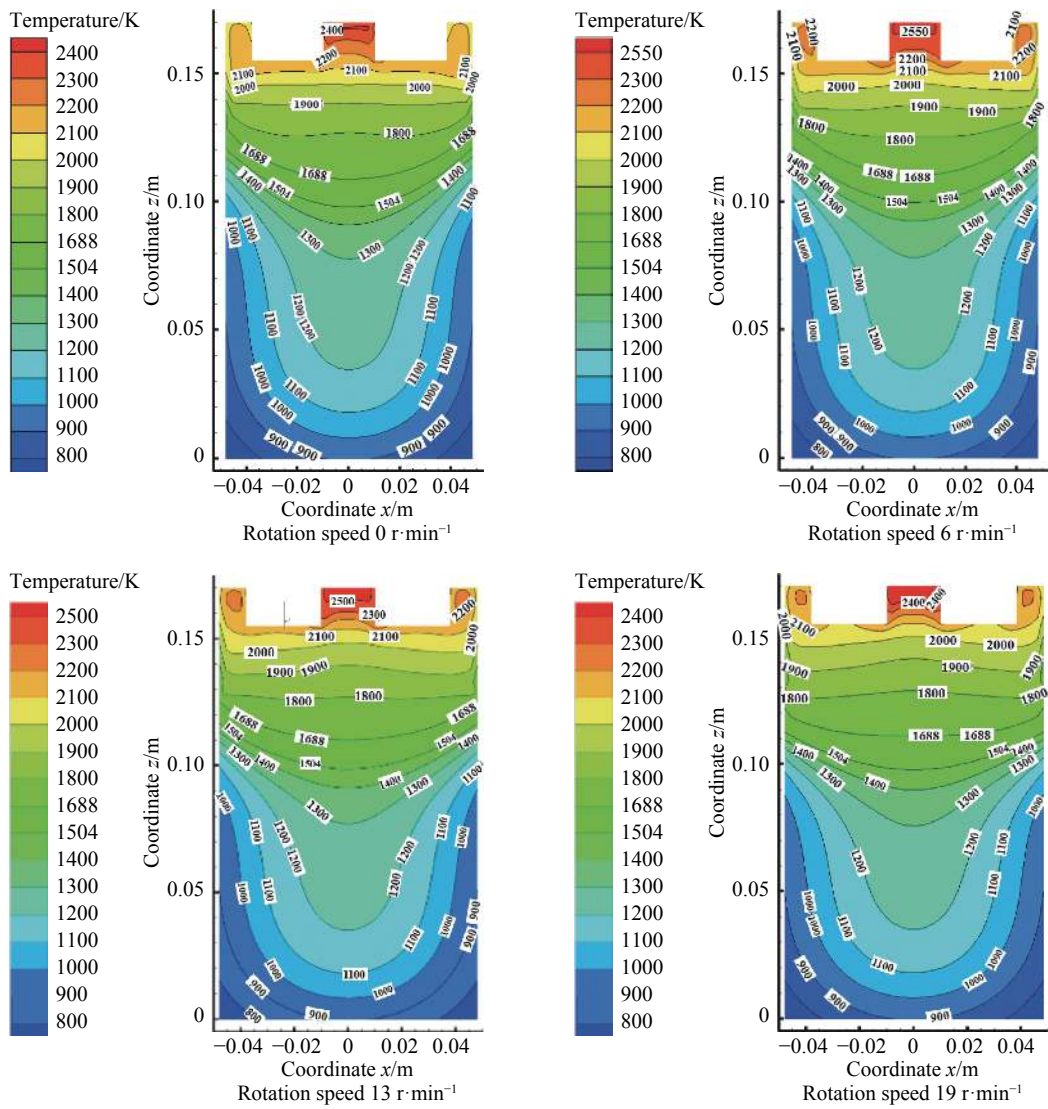


图 4 不同结晶器转速下电渣锭/渣池的纵向温度场分布

Fig.4 Longitudinal temperature distribution of the ESR ingot and slag pool with different mold-rotation speeds

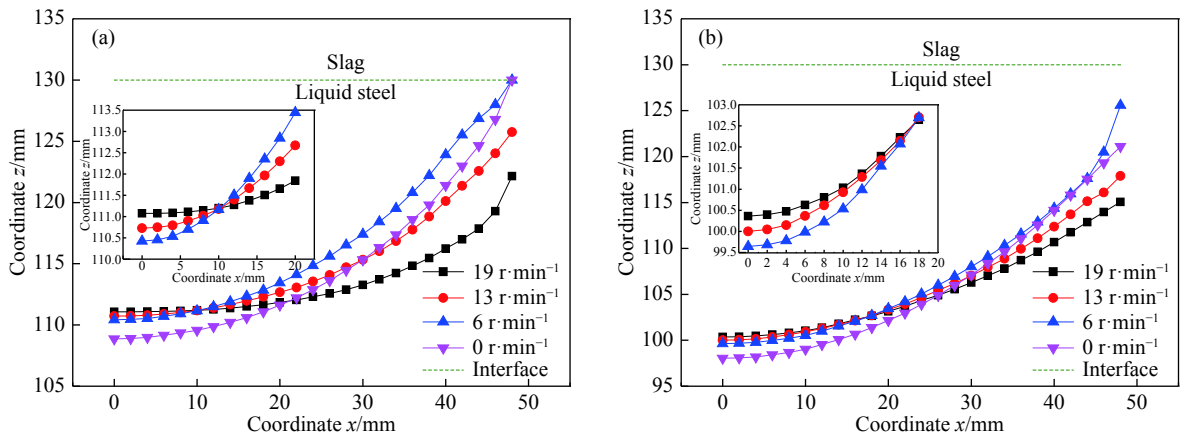


图 5 不同转速下液相线与固相线的位置. (a) 液相线; (b) 固相线

Fig.5 Locations of liquidus and solidus phases with different mold-rotation speeds: (a) liquidus temperature; (b) solidus temperature

0 ~ 5 ℃, 总电流 ≤ 0.6 A. 电解完成后, 收集电解残渣并清洗干净后, 将粉末干燥并进行 X 射线衍射分析.

③ 电渣锭渣皮厚度的分析.

2.2 结果与分析

(1) 渣皮厚度的统计分析.

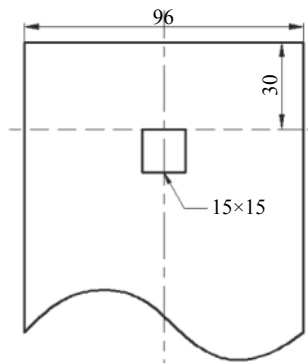


图 6 试样切取示意图(单位: mm)

Fig.6 Schematic of sample cutting (unit: mm)

薄而均匀的渣皮不仅能够使电渣锭表面质量得到提高,而且也影响电渣重熔过程的传热。实验对每个电渣锭上 200 块渣皮厚度进行了统计,如图 7 所示。可以发现,结晶器静止不动时,电渣锭的渣皮厚度分布范围大,且分布不均匀。随着结晶器的旋转,渣皮厚度变的薄而均匀。当结晶器转速达到 $19 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,渣皮厚度不大于 1.4 mm 。

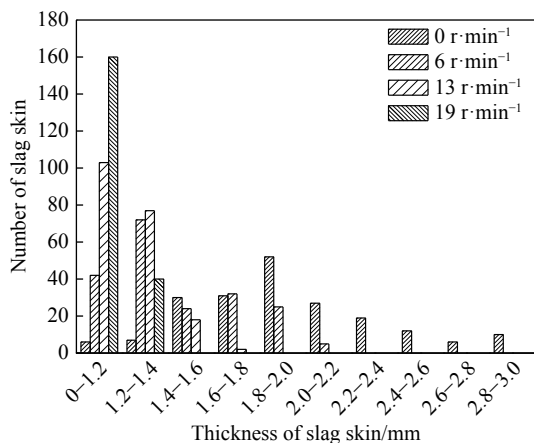


图 7 结晶器旋转速度与渣皮厚度关系

Fig.7 Relationship between mold-rotation speed and slag-skin thickness

渣皮的形成过程如图 8 所示。由于结晶器侧部的强冷,渣池中首先形成一层渣皮,渣皮的厚度除了与渣本身的物理性质有关外,还与渣池的温度场分布有关。如果渣池的高温区位于中心部位,边部的温度较低,则渣皮较厚;反之相反。传统的两极串联电渣重熔炉,由于渣池边部和芯部的温差较大,导致渣皮较厚,表面质量较差。随着结晶器转速的增加,渣池的高温区从结晶器芯部逐渐移至边部,边部温度增加,渣皮厚度降低。同样,渣-金界面高温区向边部的移动,导致金属熔池的高温区也向边部移动,如图 3 所示。因此,渣池中形成的渣皮会部分被高温金属重新熔化,进一步降低渣皮厚度。而渣皮厚度的减小,有利于

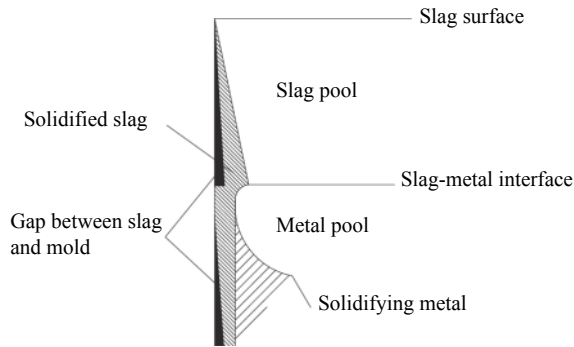


图 8 渣皮形成过程

Fig.8 Formation of slag skin during the ESR process

结晶器的侧部传热,从而可进一步减小金属熔池深度。

(2) 结晶器旋转对碳化物分布及微观形貌的影响。

M2 高速钢铸态组织中的碳化物分布如图 9 所示。不论重熔过程结晶器是否旋转,碳化物都成网状分布,随着结晶器旋转其形貌发生了变化。当结晶器静止时,碳化物的网格较大,而且有大块的碳化物聚集。当旋转速度为 $6 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,仍有大块碳化物析出,但是网格开始破碎。特别是当旋转速度增加至 $19 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,网格破碎明显,且网格变薄。

图 10 为碳化物的三维形貌图。结晶器静止时,碳化物的尺寸较大,是以片状的形态出现;当结晶器转速继续增大至 $6 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 和 $13 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,碳化物的形貌依旧为片状,但是随着结晶器转速的增大,碳化物的尺寸有所减小;当结晶器转速为 $19 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时,碳化物的微观形貌发生变化,碳化物由很多细小的棒状碳化物和纤维状碳化物组成。研究已证实^[15-16],这种形状的碳化物,在热处理时易分解成细小的碳化物,且分解的碳化物易于球化,从而提高最终刀具中碳化物分布的均匀性。

(3) M2 高速钢中碳化物组织分析。

对 $0 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 和 $19 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 制备的电渣锭试样进行电解,并采用 X 射线衍射对两个试样萃取的碳化物粉末进行物相分析,如图 11 所示。无论结晶器旋转与否, M2 高速钢中碳化物的类型始终不变,由 M_2C 、 MC 和 M_6C 碳化物组成;其中 M_2C 、 M_6C 和 MC 碳化物的衍射峰依次减弱。

由图 11 的结果采用直接对比的方法可以计算出各物相的相对质量分数。其计算方法如下^[17]:

$$w_{\text{MC}} = \frac{I_{\text{MC}} K_{\text{M}_2\text{C}} K_{\text{M}_6\text{C}}}{I_{\text{MC}} K_{\text{M}_2\text{C}} K_{\text{M}_6\text{C}} + I_{\text{M}_2\text{C}} K_{\text{MC}} K_{\text{M}_6\text{C}} + I_{\text{M}_6\text{C}} K_{\text{M}_2\text{C}} K_{\text{MC}}} \quad (11)$$

其中: w_{MC} 为 MC 的相对质量分数, I_{MC} 、 $I_{\text{M}_2\text{C}}$ 、 $I_{\text{M}_6\text{C}}$

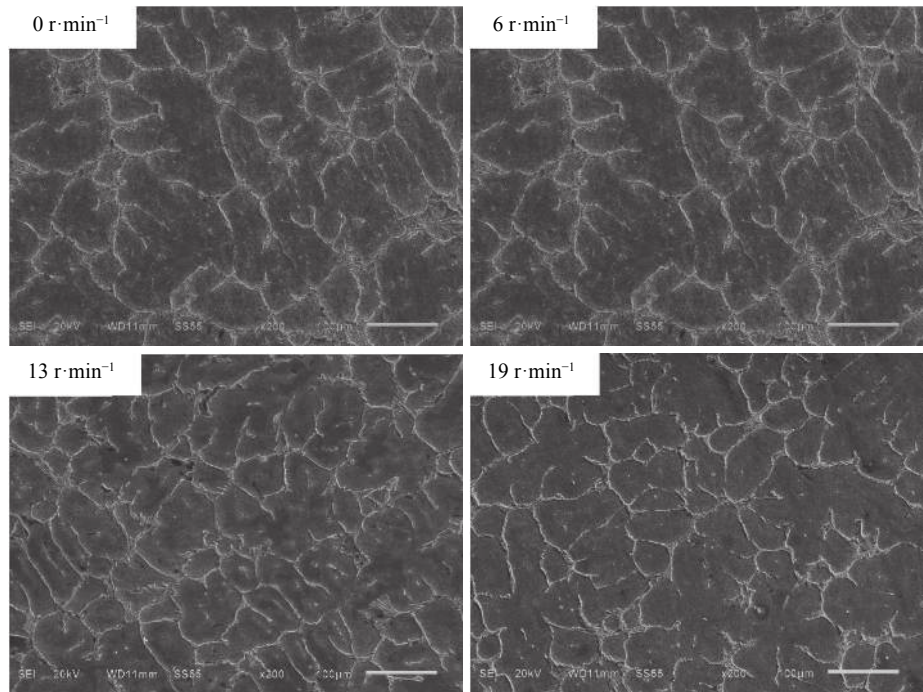


图9 不同结晶器转速对网状碳化物的影响

Fig.9 Effect of different mold-rotation speeds on the carbide network

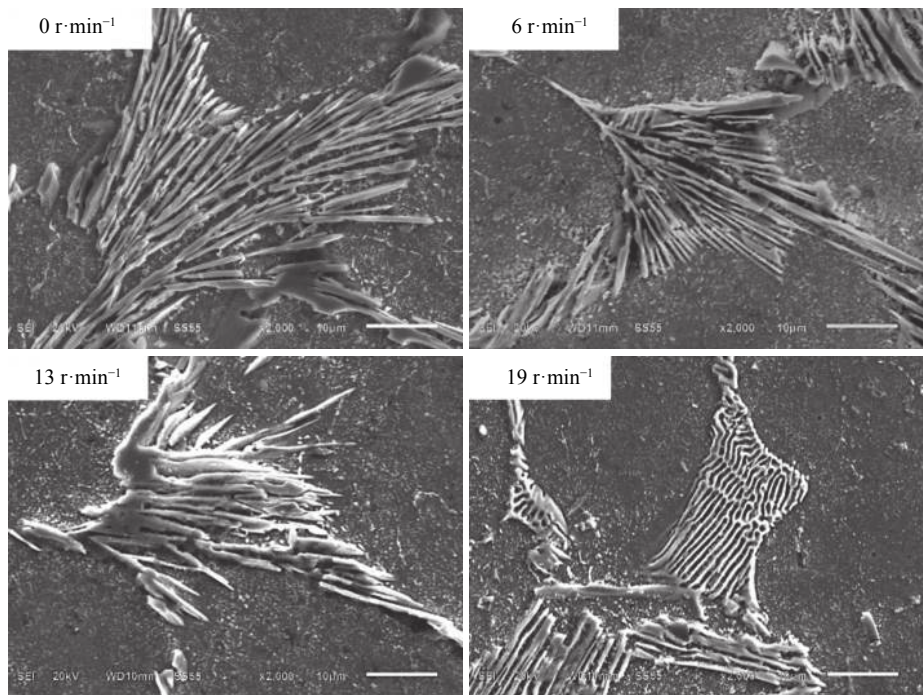


图10 不同结晶器转速下碳化物的三维形貌

Fig.10 Three-dimensional morphology of the carbides under different mold-rotation speeds

为 MC 、 M_2C 、 M_6C 衍射峰中最强峰的衍射强度， K_{MC} 、 K_{M_2C} 、 K_{M_6C} 是与待测物质结构相关、而与含量无关的物理量。计算结果如图 12 所示。从中可知，当结晶器静止时，以 M_2C 碳化物为主，其相对质量分数为 78.05%， MC 碳化物相对质量分数为 6.36%， M_6C 碳化物相对质量分数为 15.58%。而转速为 $19 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时，同样是以 M_2C 碳化物为主，其

相对质量分数为 88.54%，较上者增加了 13.44%； MC 碳化物相对质量分数为 5.44%，而 M_6C 碳化物减少至 6.01%，减少了 61.40%。在热处理过程中，由于 M_2C 碳化物的高温不稳定性，它可以分解成更为细小的 MC 和 M_6C 且利于球化，可以改善 M2 高速钢中碳化物的分布； M_6C 碳化物为鱼骨状，在高温下能够保持稳定，不易被分解，同时在

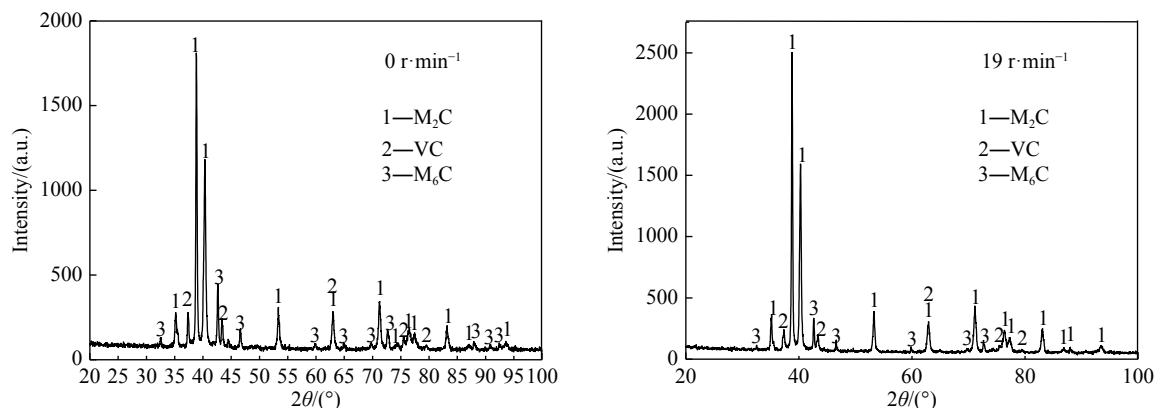


图 11 结晶器转速为 0 与 9 r·min⁻¹ 时高速钢萃取碳化物粉末的 X 射线衍射图

Fig.11 XRD pattern of carbide powder obtained from high-speed steel at the mold-rotation speed 0 and 9 r·min⁻¹

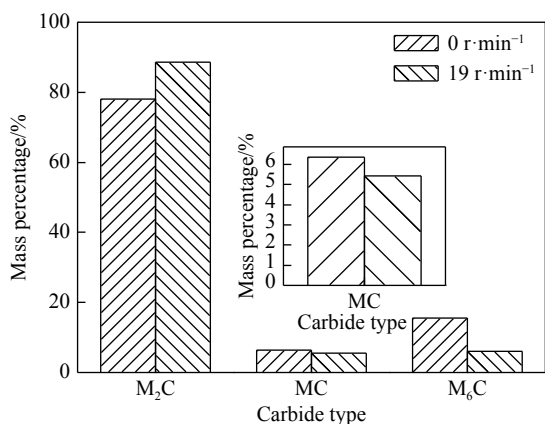


图 12 结晶器转速对碳化物组成的影响

Fig.12 Effect of mold-rotation speed on carbide composition

轧制过程中也不易破碎,即使被破碎,也会带有棱角和尖角,增大 M2 高速钢开裂的几率,因此 M₆C 的降低也有利于高速钢质量的改善。

(4) 分析.

碳化物组织的细化与局部凝固时间有关. 局部凝固时间(LST)标志合金在固液两相区的停留时间,即合金完成凝固所消耗的时间,它是评定合金显微结构的重要判据,决定合金一次晶轴间距、二次晶轴间距. 局部凝固时间越短,枝晶间距越小,元素偏析越轻,有利于碳化物的细化. 图 13 为电渣重熔过程金属熔池的界面形状. 电渣重熔过程中,局部凝固时间、局部凝固速度的表达式如下^[18].

$$V_r = V \cdot \sin\theta \quad (12)$$

$$\text{LST} = \frac{X}{V_r} \quad (13)$$

式中: V_r 为局部凝固速度, mm·min⁻¹; X 为两相区宽度, mm; V 为电渣重熔轴向速度, mm·min⁻¹; LST 为局部凝固时间, min; θ 为局部界面的切线与界面轴向 BB' 的交角 (图 13)。

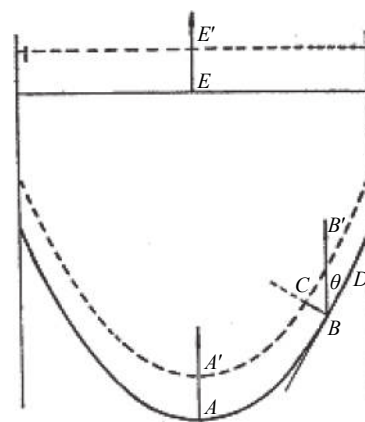


图 13 电渣重熔过程金属熔池的界面形状

Fig.13 Interface shape of metal pool during ESR

Flemings^[19] 指出,局部凝固时间 LST 和枝晶晶轴间距 d 的关系为:

$$\log d = k_1 + k_2 \log \text{LST} \quad (14)$$

式中: d 为晶轴间距, μm ; k_1 、 k_2 为常数,由合金成分确定。

从图 13 可以看出,随着结晶器的旋转,金属熔池深度降低, θ 角度增大,由公式(12),局部凝固速度增加. 同时,两相区厚度即 X 也随着结晶器旋转速度的增加而降低. 根据公式(13),局部凝固时间减少. 根据公式(14),枝晶间距降低,元素偏析减轻。

在 M2 凝固过程中,由于选分结晶,当 C 元素与 V、Mo、Cr、W 等合金元素的溶度积达到了析出的热力学条件时,一次碳化物产生,并在随后的凝固过程中长大. 当结晶器静止时,二次枝晶间距较大,元素偏析较重,为碳化物的长大提供了空间,如图 14(a) 所示(PDA 为一次枝晶臂;SDA 为二次枝晶臂),因此碳化物的尺寸较大;当结晶器转速增大,枝晶间距变小,元素偏析程度减轻,碳化物生长的空间受限,碳化物的长大被抑制,如

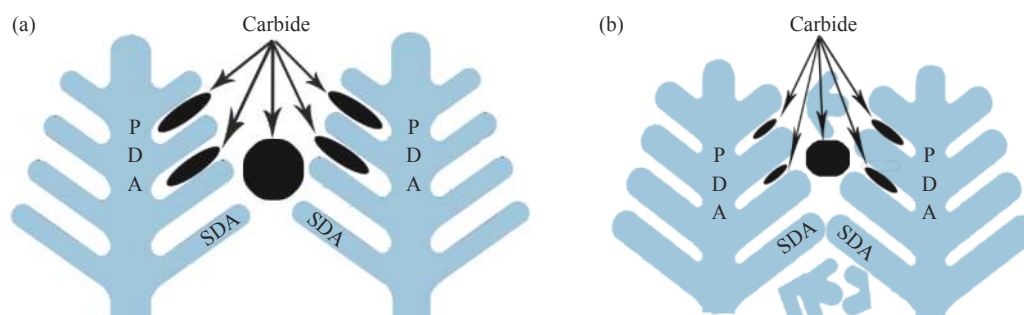
图 14 碳化物生长示意图. (a) $\omega=0$; (b) $\omega>0$ Fig.14 Schematic of carbide growth: (a) $\omega=0$; (b) $\omega>0$

图 14(b), 碳化物尺寸变小. 同时, 由于凝固过程元素偏析程度降低, 液相中满足 MC 、 M_6C 等碳化物析出的合金元素浓度降低, 因此碳化物数量也相对降低. 但是在 M2 凝固过程中, 高速钢中不同种类的碳化物由于其形成的热力学条件不同, 其析出顺序是不同的. 根据文献 [20], M2 凝固时, 碳化物的析出顺序是 $MC>M_6C>M_2C$, 即 MC 先析出, 之后 MC 和 M_6C 同时析出, 最后 MC 、 M_6C 和 M_2C 同时析出. M2 高速钢中, 铸态组织中的 MC 主要是 VC 型碳化物, 由于 M2 中 V 含量较低, 因此冷却速度对 V 偏析影响较小, 从而对 VC 碳化物的形成影响也较小, 且碳化物总量也较少. 而 M_6C 是在凝固过程由于液相中合金元素的偏析所造成, 偏析越大, M_6C 产生量越大, 因此结晶器旋转导致的元素偏析程度降低, 其生成量减少. 而 M_2C 主要在凝固末端形成, 此时凝固已接近完成, 因此元素的偏析对其影响也较小. 另外, M_2C 碳化物中的金属元素主要是 Mo 、 V 、 W , 还含有少量的 Cr 和 Fe , 这些元素在 M2 高速钢中大量存在, 因此 M_2C 碳化物产生量较多^[21].

3 结论

(1) 数值模拟结果表明, 随着结晶器旋转速度的增加, 渣池的高温区向结晶器边部移动, 金属熔池深度变浅, 两相区宽度降低.

(2) 随着结晶器旋转速度的增加, 渣皮厚度变薄且更加均匀; 网络破碎明显, 且网络变薄; 碳化物由片状改变为细小的棒状; 碳化物的类型始终不变, 由 M_2C 、 MC 和 M_6C 组成, 但是 M_2C 含量增加, MC 和 M_6C 含量降低.

(3) 结晶器旋转导致金属熔池深度降低、两相区宽度收窄, 改善了凝固条件, 减轻了元素偏析, 使碳化物组织得以细化.

参 考 文 献

- [1] Luan Y K, Song N N, Bai Y L, et al. Effect of solidification rate on the morphology and distribution of eutectic carbides in centrifugal casting high-speed steel rolls. *J Mater Process Technol*, 2010, 210(3): 536
- [2] Ji Y L, Zhang W, Chen X Y, et al. Increasing solidification rate of M2 high-speed steel ingot by fusible metal mold. *Acta Metall Sin (English Lett)*, 2016, 29(4): 382
- [3] Li Z B. *Electroslag Metallurgy Theory and Practice*. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2010
(李正邦. 电渣冶金理论与实践. 北京: 冶金工业出版社, 2010)
- [4] He B, Li J, Shi C B, et al. Effect of cooling intensity on carbides in Mg-containing H13 steel during the electroslag remelting process. *Chin J Eng*, 2016, 38(12): 1720
(贺宝, 李晶, 史成斌, 等. 电渣重熔过程冷却强度对含镁 H13 钢中碳化物的影响. 工程科学学报, 2016, 38(12): 1720)
- [5] Hellman P. High-speed steels by powder metallurgy. *Scand J Metall*, 1998, 27(1): 44
- [6] Zhong H L, Fang Y, Kuang C, et al. Development of powder metallurgy high speed steel. *Maters Sci Forum*, 2010, 638-642: 1854
- [7] Li J, Li J, Shi C B, et al. Effect of trace magnesium on carbide improvement in H13 steel. *Can Metall Q*, 2016, 55(3): 321
- [8] Zhou X F, Fang F, Tu Y Y, et al. Carbide refinement in M42 high speed steel by rare earth metals and spheroidizing treatment. *J Southeast Univ English Ed*, 2014, 30(4): 445
- [9] Wang M J, Chen L, Wang Z X, et al. Influence of rare earth elements on solidification behavior of a high speed steel for roll using differential scanning calorimetry. *J Rare Earths*, 2011, 29(11): 1089
- [10] Chang L Z, Shi X F, Cong J Q, et al. Effects of relative motion between consumable electrodes and mould on solidification structure of electroslag ingots during electroslag remelting process. *Ironmaking Steelmaking*, 2014, 41(8): 611
- [11] Chang L Z, Shi X F, Wang R X, et al. Effect of mold rotation on inclusion distribution in bearing steel during electroslag remelting process. *China Foundry*, 2014, 11(5): 452

- [12] Ge B L. *Numerical Simulation of Slag Composition Change Influence on ESR Process*[Dissertation]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2016
(葛蓓蕾. 电渣重熔过程中渣成分变化对电渣冶金过程影响的数值模拟[学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2016)
- [13] Li B K, Wang Q. *Theory and Technology of Electroslag Remelting Based on Numerical Simulation*. Beijing: Science Press, 2016
(李宝宽, 王强. 基于数值模拟的电渣重熔理论与技术. 北京: 科学出版社, 2016)
- [14] Wang F, Li B K. Electromagnetic field and Joule heating of an electroslag remelting process with two series-connected electrodes. *J Northeast Univ Nat Sci*, 2011, 32(4): 533
(王芳, 李宝宽. 双级串联电渣重熔系统电磁场和焦耳热场研究. 东北大学学报(自然科学版), 2011, 32(4): 533)
- [15] Zhou X F, Liu D, Zhu W L, et al. Morphology, microstructure and decomposition behavior of M_2C carbides in high speed steel. *J Iron Steel Res Int*, 2017, 24(1): 43
- [16] Zhou X F, Fang F, Jiang J Q, et al. Refining carbide dimensions in AISI M2 high speed steel by increasing solidification rates and spheroidising heat treatment. *Mater Sci Technol*, 2014, 30(1): 116
- [17] Feng W W. *The Carbide Characteristics of M2 High Speed Steel Containing Nitrogen and Rare Earth*[Dissertation]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2013
(冯唯伟. 含氮与稀土M2高速钢碳化物特性研究[学位论文]. 秦皇岛: 燕山大学, 2013)
- [18] Chang L Z, Li Z B. Method of controlling solidification quality in electroslag remelting process. *Steelmaking*, 2007, 23(4): 56
(常立忠, 李正邦. 电渣重熔过程中金属凝固的控制方法. *炼钢*, 2007, 23(4): 56)
- [19] Flemings M C. *Solidification processing*. Translated by Guan Y L, Tu B H, Xu C X. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1981
(弗莱明斯 M C. 凝固过程. 关玉龙, 屠宝洪, 许诚信, 译. 北京: 冶金工业出版社, 1981)
- [20] Wang Q M, Cheng G G, Huang Y. Morphology and precipitation mechanism of large carbides in M2 high speed steel. *Iron Steel*, 2018, 53(1): 65
(王启明, 成国光, 黄宇. M2高速钢大尺寸碳化物的形貌特征及析出机理. *钢铁*, 2018, 53(1): 65)
- [21] Deng Y R, Chen J R, Wang S Z. *High Speed Tool Steel*. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2002
(邓玉昆, 陈景榕, 王世章. 高速工具钢. 北京: 冶金工业出版社, 2002)