

# 连铸圆坯有无电磁搅拌时的流场-温度场数值模拟

王哨兵<sup>1</sup>, 李建超<sup>1</sup>

(1 内蒙古工业大学材料科学与工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010051)

**摘要:** 本文以Φ430mm 的圆坯为实验对象, 采用磁场传输方程和  $k-\varepsilon$  双方程模型对钢液的流场和温度场进行耦合数值模拟, 分析出在有无电磁搅拌的情况下, 结晶器内钢液的流场和温度场分布情况, 进一步改变电流频率, 分析在不同的电流频率下的流场和温度场分布情况。模拟结果表明: 施加电磁搅拌时, 迫使结晶器纵向截面内的钢液出现上、下两对回流区, 其回流方向相反, 钢液在水平截面内做旋转运动; 铸坯芯部温度降低, 高温区域范围缩小, 热区位置上移。  
**关键词:** 圆坯; 电磁搅拌; 流场; 温度场; 数值模拟

## The numerical simulation on flow field and temperature field in Round Billet in Continuous Casting with and without EMS

Shaobing Wang<sup>1</sup>, Jianchao LI<sup>1</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Inner Mongolia Hohhot 010051, China)

**Abstract:** Taking Φ430 mm of round billet as experimental object, The magnetic field transport equation and  $k-\varepsilon$  equation were adopted to establish the coupled model of flow field and temperature field, Analysis the presence of electromagnetic stirring for molten steel in mould flow field and temperature field distribution, Change the current frequency, further analysis under different current frequency of flow field and temperature field distribution. Applying electromagnetic stirring, the simulation results show that the force of liquid steel in mold longitudinal cross-section in upper and lower two pairs of backflow area, the flow direction on the contrary, rotation of the molten steel in the horizontal section; Slab core temperature decrease, the high temperature area shrinking and the hotspot location up.

**Key words:** Round billet; Electromagnetic stirring ;Flow field; Temperature field ;Numerical simulation

## 1 引言

连铸圆坯在浇注过程中, 芯部钢液不容易凝固, 因此容易出现中心缩孔、白亮带、中心偏析和内部裂纹等缺陷。施加电磁搅拌后, 当钢水达到一定的旋转速度, 产生足够大的离心力迫使夹杂物和气泡上浮, 并且被熔融的保护渣吸收, 从而有效的净化凝固前沿, 使其形成均匀的凝固坯壳提高铸坯的中心质量<sup>[1-7]</sup>。

<sup>1</sup>基金名称: 内蒙古自治区自然科学基金项目(2014MS0545); 内蒙古工业大学科学研究项目(ZD201306)

作者简介: 王哨兵(1989-8), 男, 安徽合肥人, 硕士研究生, 主要研究方向: 电磁冶金新技术, E-mail: 543922163@qq.com。

## 2 数学模型

### 2.1 模型假设

连铸圆坯流场-温度场的数值模拟，采取一定的假设条件：

- (1)在结晶器内流动的钢液按均相介质处理；
- (2)通常情况下，钢液在结晶器内的流动认为是不可压缩的粘性流动；
- (3)不考虑已凝固坯壳和振动对钢液流动的影响，忽略结晶器壁的倾斜效果；
- (4)不考虑结晶器渣层和结晶器锥度对流场的影响；

### 2.2 边界条件

- (1)入口边界条件：边界条件设定为 velocity-inlet，速度可以利用质量守恒原理来求解。
- (2)出口边界条件：结晶器底部为出口，边界条件设定为 outflow，大小为拉速；
- (3)空气边界条件：空气的上表面看做为对称面，边界条件设定为 symmetry；空气的下表面为空气相和钢液相的交界面，边界条件设定为 interior。
- (4)壁面边界条件：结晶器和水口壁面的边界条件设定为无滑移边界，近壁处的处理方式依据标准壁面函数，水口壁面的边界条件设置为绝热条件，结晶器壁面处的温度设置应该以钢液液相温度为标准。
- (5)各相的初始化：在进行求解计算时，应将模型初始化，再进行数值模拟。

### 2.3 控制方程

我们知道钢水在结晶器内的流动是以湍流流动的方式进行的，由于其具有耗散性、三维性、不规则性等特点，因此，在进行细致的分析钢液在结晶器内的流动行为有质量守恒方程、动量方程（N-S 方程）和  $k$ - $\varepsilon$  湍流方程，

- (1)质量守恒方程：

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0$$

- (2) 动量方程(N-S 方程):

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu_{eff} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right]$$

- (3) 湍动能( $k$ )方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \rho u_i k - \frac{\mu_{eff}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] = G_k - \rho \varepsilon$$

- (4) 湍动能耗散率( $\varepsilon$ )方程:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \rho u_i \varepsilon - \frac{\mu_{eff}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] = (C_1 \varepsilon G_k - C_2 \rho \varepsilon^2) / k$$

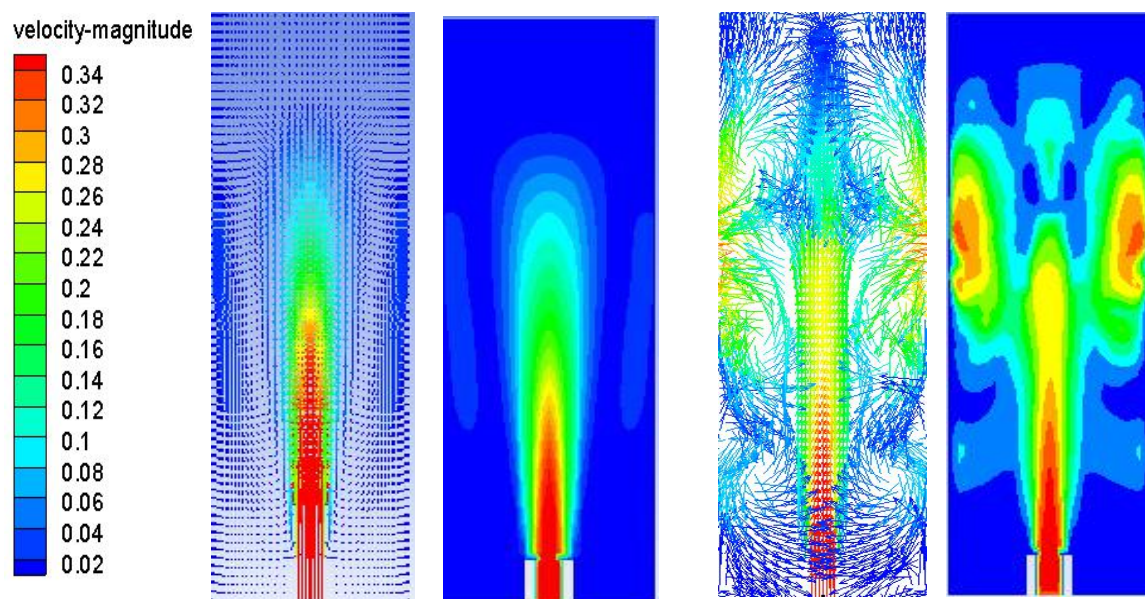
$$\text{其中: } G_k = \mu_t \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \left[ \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right], \quad \mu_{eff} = \mu_l + \mu_t, \quad \mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

其中方程中的其他参数如  $C_1$ ， $C_2$ ， $C_\mu$ ， $\sigma_k$ ， $\sigma_\varepsilon$  等为常数；其值为： $C_1=1.44$ ， $C_2=1.92$ ，

$$C_\mu=0.09, \quad \sigma_k=1.0, \quad \sigma_\varepsilon=1.3。$$

### 3 结果分析

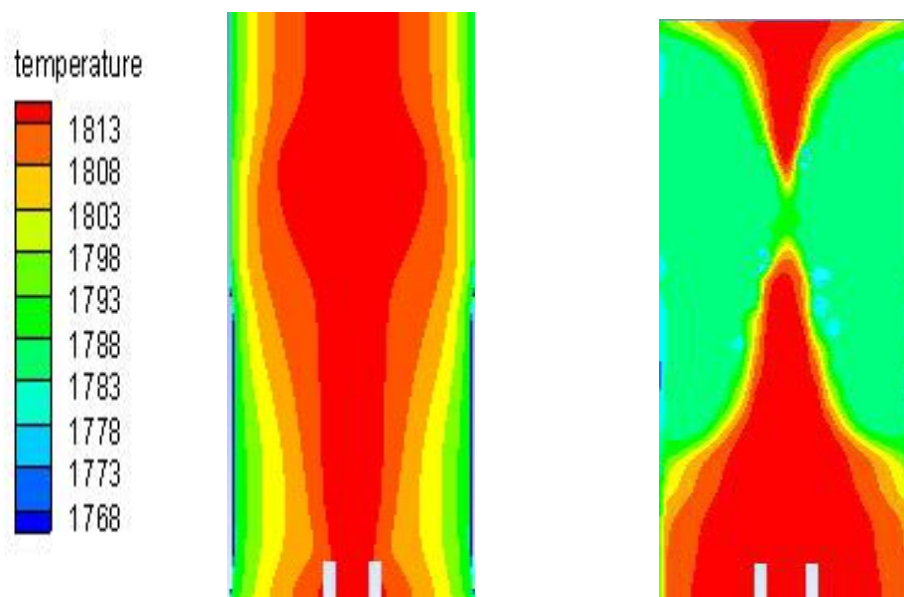
#### 3.1 有无电磁搅拌时结晶器内流场和温度场的分布特征



(a) 无电磁搅拌流场矢量图和云图 (b) 有电磁搅拌流场矢量图和云图

图 3.1 有无电磁搅拌时结晶器中心对称面的流场矢量图和云图

Fig3.1 Schematic diagram of the flow field vector and the cloud for the mold center of symmetry Without EMS (a) and with EMS (b)



(a) 无电磁搅拌温度云图

(b) 有电磁搅拌温度云图

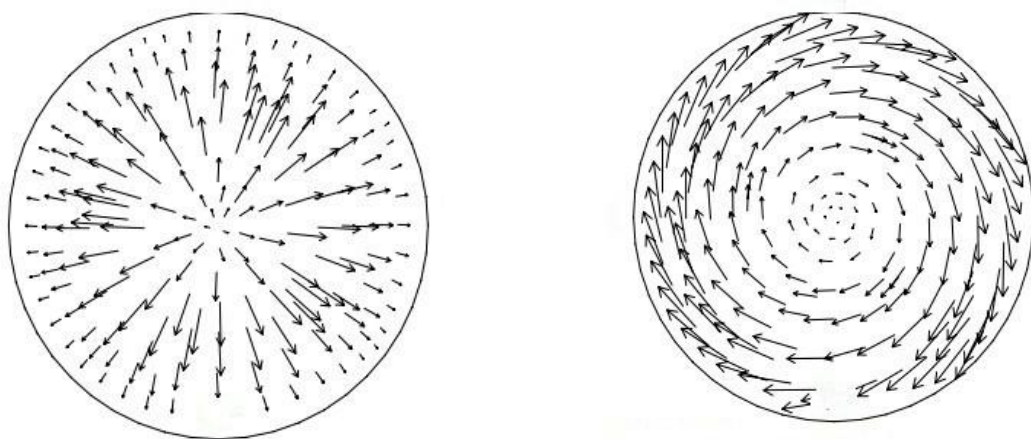
图 3.2 有无电磁搅拌时中心截面处的温度场示意图

Fig3.2 Schematic diagram of the temperature field for the mold center of symmetry Without EMS (a) and with EMS ( $I=400A$ ,  $f=3HZ$ ) (b)

图 3.1 表示的有无电磁搅拌时结晶器中心对称面的钢液流场矢量图和云图。图 3.1 (a) 可以看出在没有施加电磁力的情况下，过热的钢水通过直水口直接进入结晶器后，只有极

少部分的钢液在上部分形成有中心向下通过结晶器凝固的侧面向上流动,形成一对上回流区域,其余大部分的钢水直接向下流动,直到流出结晶器。此时钢水的过热度消失的比较缓慢,铸坯芯部的高温区域将会一直延长到结晶器底部。图 3.1 (b) 表示施加电磁搅拌后,由于径向电磁力和由上向下的电磁力梯度的作用,过热钢液除在上部区域形成一对回流外,大部分钢液在下部区域形成一对由凝固面一侧向下而由中心向上流动的回流区,其回流方向与上回流区回流方向正好相反;同时,钢液在结晶器内处于水平旋转运动

图 3.2 (a) 为无电磁搅拌时结晶器内中心纵向截面上钢液温度的分布图,从图中可以看出,过热钢水从水口流出,向下流动,过热度慢慢的消失。在靠近中心位置,温度最高,在趋向于铸坯表面的一侧,钢水温度急剧下降。图 3.2 (b) 表示在施加电磁搅拌的作用下结晶器内中心横截面上钢液温度的分布图,从图中可以看出,由于电磁力的驱动使得钢水做旋转运动,从而导致从水口流出的流股的冲击深度变浅,从而使得钢水的温度在拉坯方向迅速的降低,这就是电磁搅拌提高热区位置的效应。在电磁搅拌下,结晶器内的钢水的过热快速的消失,这就解释了结晶器电磁搅拌能提高等轴晶区的现象。



(a) 无电磁搅拌时水平截面内的速度分布 (b) 有电磁搅拌时水平截面内的速度分布

图 3.3 有无电磁搅拌时结晶器水平截面内的速度分布

Fig3.3 Distributions of velocity field at the horizontal section in the mold without EMS (a) and with EMS (  $I=400A$ ,  $f=3HZ$  )(b)

如图 3.3 (a) 所示,无电磁搅拌作用时,钢液在水平截面内只有中心向外的径向速度。如图 3.3 (b) 施加电磁搅拌后由于旋转电磁力的作用,钢液在水平截面内旋转运动,切向速度由边部向中心逐渐减小。钢液旋转切向速度的存在可有效阻断凝固过程树枝晶的形核,有利于等轴晶的生长和均匀凝固坯壳的形成。

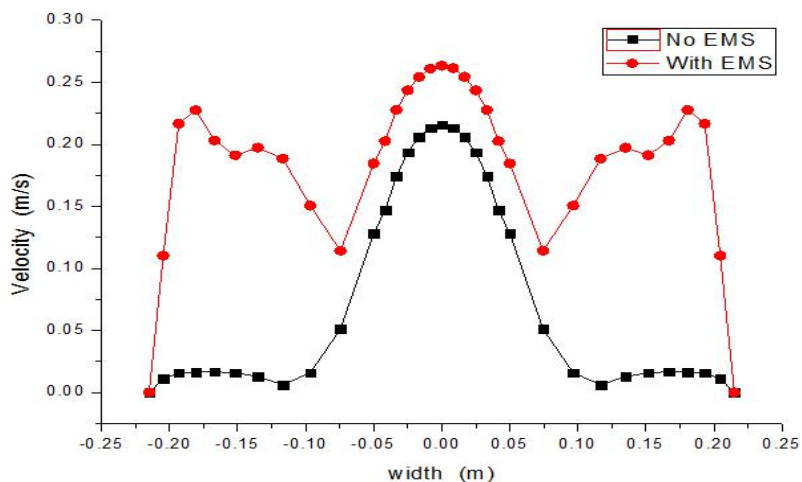


图 3.4 有无电磁搅拌时结晶器中心的水平截面速度分布

Fig3.4 Distributions of axial velocities along the line of  $x=0$  m and  $y=0$  m in the mold without EMS and with EMS (  $I=400$ A,  $f=3$ HZ )

图 3.4 表示有无电磁搅拌时结晶器中心的水平截面速度分布。在不施加电磁搅拌时，沿着中心轴线附近的流速较大，铸坯边部凝固成坯壳，起到了阻碍钢液的流动，因此其速度较小，在施加电磁搅拌的情况下，钢液不容易凝固，在结晶器内会形成环流区域，速度发生突变，将柱状晶粒打碎，形成等轴晶粒，提高铸坯的产品性能。

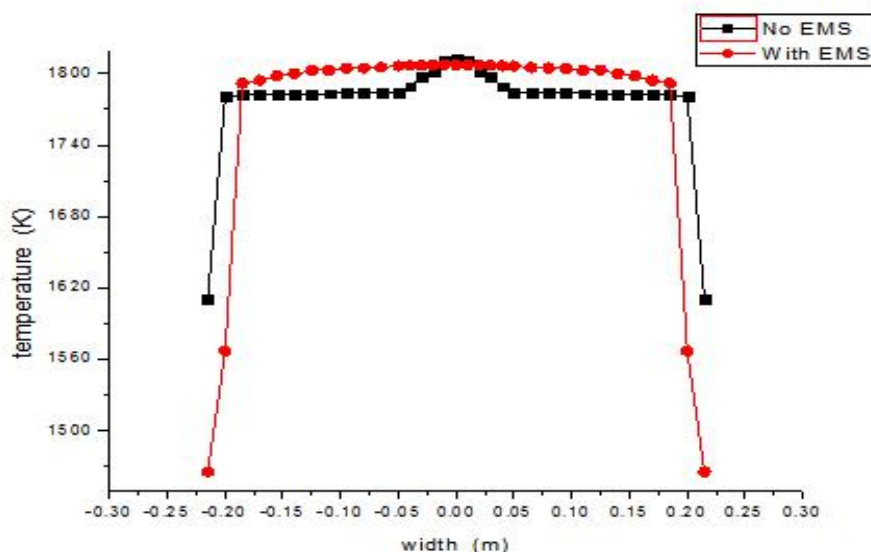


图 3.5 有无电磁搅拌时结晶器中心水平截面的温度分布

Fig3.5 Distributions of axial temperature along the line of  $x=0$  m and  $y=0$  m in the mold without EMS and with EMS (  $I=400$ A,  $f=3$ HZ )

图 3.5 所示，无电磁搅拌时，大部分的钢液主要做竖直向下运动，此时在铸坯的中心部分的钢液没有凝固，凝固的坯壳厚度薄，边部温度在凝固时达到了 1610K，此时坯壳的厚度大约在 15mm 左右。与此同时，铸坯中心部位的温度高，最高温度可能达到 1813K。在施加电磁搅拌后，在结晶器内的钢水做旋转运动，迫使大部分的柱状晶粒破碎，此时凝固的铸坯坯壳厚度均匀，凝固的坯壳厚度也比没有电磁搅拌的厚度厚，边部温度达到了 1465K，此时的坯壳厚度大约为 25mm。



## 3.2 搅拌电流的频率对结晶器内流场和温度场的影响

在搅拌电流强度为 400A，水口插入深度为 100mm 时，搅拌频率从 2hz 到 4hz 范围内的工艺条件下，对结晶器内的钢液流场和温度场进行数值模拟。分析出电流频率对流场和温度场的影响，进而对现场电磁搅拌工艺参数的调节提供依据。

### 3.2.1 搅拌电流频率对流场的影响

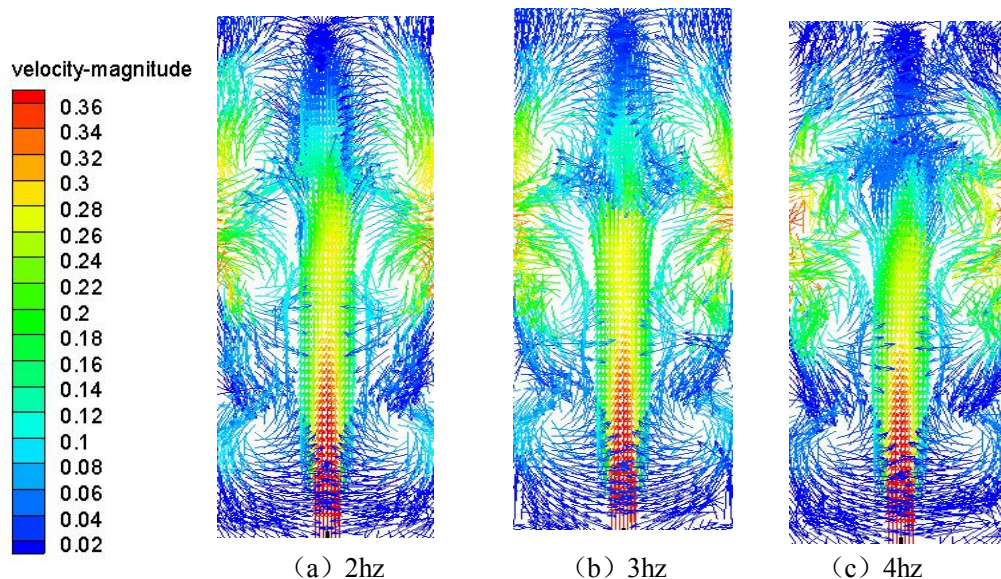


图 3.6 不同电流频率下竖直截面上的流场矢量图

Fig 3.6 The different current frequency with the flow field vector picture on the vertical section

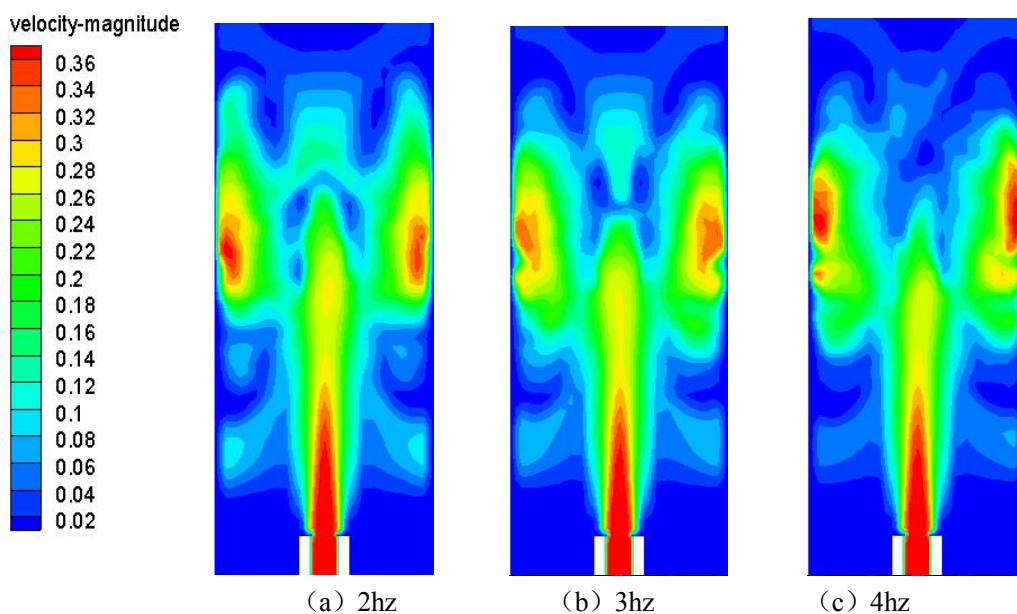


图 3.7 不同电流频率下竖直截面上的流场云图

Fig 3.7 The different current frequency with the flow field cloud picture on the vertical section

图3.6和图3.7表示在不同电流频率下搅拌线圈中心在纵向截面上的流场矢量图和流场云图。从图中可以看出，随着电流频率的增大，回流区的位置升高，从水口流出的钢水的最大冲击深度减小。在电流频率较小时，下回流区还没有形成，随着电流频率的增大，下回流区开始形成，上回流区位置提高。

### 3.2.2 搅拌电流频率对温度场的影响

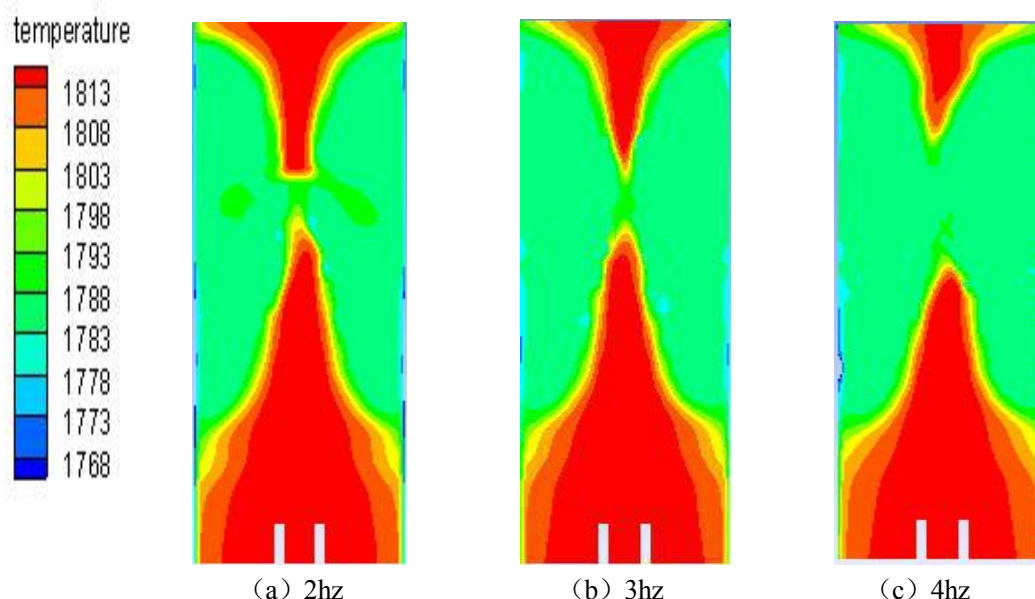


图 3.8 不同电流频率下竖直截面上的温度场云图

Fig 3.8 The different current frequency with the temperature field cloud picture on the vertical section

图 3.8 为不同电流频率下结晶器中心纵向截面上钢液温度的分布图，从图中可以看出，随着电流频率的增大，结晶器内钢液过热钢液的热区位置不断提高，高温区域的增大，钢液过热度 and 芯部温度也越来越低，这对保护渣的熔化、凝固前沿的枝晶重新熔化，坯壳的均匀生长都起到了有利的作用。

### 3.2.3 搅拌电流频率对水平截面的速度和温度的影响

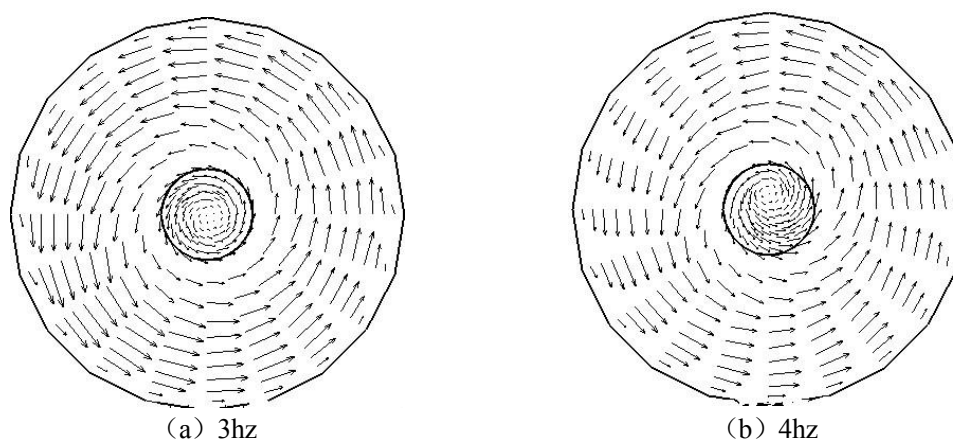


图 3.9 不同电流频率下水平截面内的速度分布

Fig 3.9 The different current frequency with the velocity field vector picture on the horizontal section

图 3.9 表示在不同的电流频率下搅拌中心位置对应的水平截面内的速度分布，由图可知，在最佳的频率范围内，随着电流频率的增大，结晶器水平截面内的钢液旋转切向速度也随之增大。

综上所述，对于 $\Phi 430\text{mm}$ 断面的圆坯，电流强度在 400A 时，最佳的电流搅拌频率为 3HZ~4HZ，以上数据只是根据数值模拟得到的结果，纯属于理论计算，该搅拌参数是否合理，还需要根据实际生产时的铸坯低倍组织和夹杂物的来源分析进行检验。

## 4 结论

电磁搅拌使结晶器纵向截面内的钢液出现上、下两对回流区，其回流方向相反，钢液在水平截面内做旋转运动；搅拌使结晶器内过热的钢液滞留在上部区域，铸坯芯部温度降低，高温区域范围缩小，热区位置上移；随着电流频率（最佳频率范围内）的增加，钢液的旋转速度和下回流区域的范围均随之扩大，芯部温度越来越低，芯部高温区域的范围越来越小，热区位置不断上移。

### 参考文献

- [1]邢文彬. 电磁搅拌对连铸质量的影响[J]. 连铸, 1990 (2): 10-15.
- [2]贺幼良. 电磁场作用下的金属凝固于成型[J]. 材料导报, 2000,14 (7): 3-7
- [3]于会香, 张炯明, 王万军等. 板坯连铸浸入式水口出口速度对结晶器流场影响的数值模拟[J]. 北京科技大学学报, 2002, 24(5): 492-496.
- [4]张乔英,王书桓,王立涛等. SEN 壁厚对结晶器内钢液流场和温度常的影响[J]. 炼钢, 2005,21(3):51-53
- [5] 雷方,赫冀成,李宝宽.板坯连铸机结晶器内钢液流动的数值分析.东北大学学报:自然科学版, 1995, 16(4): 409-411
- [6] 朱苗勇,肖泽强. 连铸中间包内三维流动的数学模拟. 东北大学学报:自然科学版, 1995, 16(4): 352-355
- [7] 马范军, 文光华, 李刚. 板坯连铸结晶器内钢液流动数值模拟[J], 金属学报, 2000, 36(4): 399-402.