

# FTSC 薄板坯连铸结晶器内的热/力行为研究

Study on Temperature and Stress Behavior in FTSC Thin Slab Continuous Casting Mold

果晶晶<sup>1</sup>, 郝华强<sup>1,2</sup>, 杨晓江<sup>2</sup>, 刘增勋<sup>1</sup>, 王书桓<sup>1</sup>

(1 河北理工大学 冶金与能源学院, 河北 唐山 063009;

2 唐山钢铁股份有限公司, 河北 唐山 063016)

GUO Jing-jing<sup>1</sup>, HAO Hua-qiang<sup>1,2</sup>, YANG Xiao-jiang<sup>2</sup>,

LIU Zeng-xun<sup>1</sup>, WANG Shu-huan<sup>1</sup>

(1 College of Metallurgy and Energy, Hebei Polytechnic University,

Tangshan 063009, Hebei, China; 2 Tangsteel Group, Tangshan 063016, Hebei, China)

**摘要:** 基于 SPHC 钢在  $H^2$  结晶器内的凝固过程, 利用有限元软件 ANSYS 中的单元生死技术, 通过改变薄板坯单元的状态建立其在结晶器内随时间变化的二维非稳态模型。模拟出薄板坯在结晶器不同部位处的温度场及应力场分布情况, 其结果可为优化结晶器锥度及改善薄板坯质量提供理论依据和技术基础。

**关键词:** 薄板坯; 传热分析; 应力场

中图分类号: TF777.7 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2010)03-0070-04

**Abstract:** Based on the solidification process of SPHC steel in  $H^2$  mold, using element birth and death in ANSYS software which alters states of thin slab elements along with residence time in continuous casting mold, to simulate the thermal and mechanical states in 2D transient mode. Temperature and stress distributions of thin slab in different parts of  $H^2$  mold were obtained. This analytical work can provide theoretical bases for optimizing mold taper and improve the quality of product.

**Key words:** thin slab; heat transfer analysis; stress field

结晶器内坯壳的形成是一个热/力耦合过程。一方面, 坯壳与结晶器壁之间的热交换情况, 直接影响到钢液的凝固状况; 另一方面, 非均匀非稳态温度场的存在导致坯壳内部应力场不断变化。本工作以 FTSC 的  $H^2$  结晶器为研究对象, 对铸坯在结晶器内的温度场及应力场分布进行分析。由于该结晶器漏斗区的逐步“萎缩”会给有限元模型的计算带来比较大的困难, 前人在进行数学模拟时一般将漏斗区忽略, 而将薄板坯在  $H^2$  结晶器内钢液凝固过程视为传统板坯来对待。这种做法虽然简化了运算, 但计算精度低, 尤其是对应力场分布状况的模拟准确度较差。本工作采用 ANSYS 有限元软件的单元生死技术, 并在分析中考虑结

晶器漏斗“萎缩”及锥度对坯壳温度场、应力场的影响, 建立更加接近于生产实际的结晶器热力耦合模型进行计算分析。

## 1 结晶器区域铸坯的热/力耦合模型

模型采用运动坐标系的二维切片法, 即沿铸坯横断面方向, 按时间步长截取断面, 建立二维非稳态模型, 采用单元生死技术研究结晶器内不同部位的铸坯薄片, 从弯月面处开始以拉坯速度移动过程中所经历的热和力学过程。根据  $H^2$  结晶器的对称性, 取 1/4 铸坯横断面作为模型研究对象, 如图 1 所示。



图 1 铸坯模型

Fig. 1 Model of the slab

### 1.1 基本假设条件

(1) 拉速恒定;

(2) 忽略拉坯方向(垂直方向)的传热;

(3) 钢水在凝固过程中成分均匀;

(4) 满足小变形理论, 假设材料各向同性, 铸坯断面处于平面应力状态。

## 1.2 控制方程

结晶器的传热是连铸坯冷却凝固过程中最重要的环节, 它直接影响到铸坯的表面质量和铸机生产率。结晶器的传热应保证在规定的拉速下, 使铸坯出结晶器时, 形成具有足够厚度和均匀的坯壳<sup>[1]</sup>。

$$\rho C^* \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[ \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right] \quad (1)$$

式中:  $\rho$  为铸坯密度, ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ );  $C^*$  为铸坯等效热容, [ $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ ];  $T$  为温度, ( $^\circ\text{C}$ );  $t$  为时间, ( $\text{s}$ );  $\lambda$  为铸坯的导热系数, [ $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$ ];  $x$  和  $y$  为铸坯宽度和厚度方向的坐标, ( $\text{m}$ )。

因薄板坯在高温状态下的应力状态比较复杂, 故采用冯米赛斯等向强化准则和普朗特-路斯塑性流变法则建立增量形式的应力应变关系式, 考虑温度变化所引起的应变增量, 热弹性模型增量关系的应力应变表达式如下<sup>[2]</sup>:

$$d\{\sigma\} = [D] \cdot (d\{\epsilon\} - d\{\epsilon_0\}) \quad (2)$$

$$d\{\sigma\} = [D]_{ep} \cdot (d\{\epsilon\} - d\{\epsilon_0\} + d\{\epsilon_0\}) \quad (3)$$

式中:  $[D]$  为弹性矩阵;  $[D]_{ep}$  为弹塑性矩阵;  $\{\sigma\}$  为应力矩阵;  $\{\epsilon\}$  为应变矩阵;  $\alpha$  为热膨胀系数。

$$d\{\epsilon_0\} = \frac{[D] \cdot \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \{\sigma\}} \cdot \frac{\partial H}{\partial T} dT}{H' + \left\{ \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \{\sigma\}} \right\}^T \cdot [D] \cdot \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \{\sigma\}}}$$

$$d\{\epsilon_0\} = \left[ \{\sigma\} + \frac{d[D]^{-1}}{dT} \{\sigma\} \right] dT$$

## 1.3 定解条件

### (1) 初始条件

热分析初始条件: 弯月面处钢水均匀分布, 以此作为时间  $t = 0$ , 此时初始温度为钢水的浇铸温度  $T_c$ 。

力学分析初始条件: 弯月面处钢水静压力为零。

### (2) 边界条件

与传统板坯连铸相比, 薄板坯连铸的拉坯速度较大, 钢液在结晶器内的停留时间短, 传热上也存在较大的差异。结晶器内的热流密度表达式为<sup>[3]</sup>:

$$q = 2680 - 335\sqrt{\tau} \quad (4)$$

式中:  $q$  为热流密度, ( $\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$ );  $\tau$  为铸坯在结晶器内弯月面下停滞时间, ( $\text{s}$ );  $\tau = \frac{l_m}{v}$  (其中  $l_m$  为钢水在结晶器内的高度, ( $\text{mm}$ );  $v$  为铸坯的拉坯速度, ( $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ ))。

上述方程仅给出了弯月面下不同高度处的热流量, 并未反映出沿坯壳周边的热流量变化。然而, 结晶器壁温度场测试结果表明: 连铸坯凝固过程中, 在弯月

面下一定位置, 气隙首先形成于坯壳角部, 并且随着位置下移, 气隙区域在横向上逐渐变宽, 纵向上逐渐变厚。因此, 角部的热流量明显低于中心区的热流量。为反映出此变化趋势, 引入一个与气隙相关的系数  $c$ 。边角部热通量  $q^*$  可以定义为:

$$q^* = cq \quad (5)$$

参照唐钢 FTSC 薄板坯连铸结晶器热相图, 模拟采用的系数  $c$  取值范围如下: 把气隙的形成分为三个阶段: 第一阶段是紧密接触区, 即弯月面以下 ( $0 \sim 0.1$ )  $l_m$ ,  $c$  取 1; 第二阶段是气隙的初步形成区, 即弯月面以下 ( $0.1 \sim 0.4$ )  $l_m$ ,  $c$  取  $0.95 \sim 0.85$ ; 第三阶段为气隙稳定存在区 (结晶器内剩余部分),  $c$  取  $0.85 \sim 0.75$ <sup>[4]</sup>。

### (3) 坯壳凝固前沿的钢水静压力

在薄板坯凝固过程中, 随着温度的降低, 固态坯壳不断增厚, 凝固前沿不断向铸坯内部推进, 在薄板坯未完全凝固之前, 坯壳内表面始终受到钢水静压力的作用。

$$P_0 = \rho gh \quad (6)$$

式中:  $P_0$  为钢水静压力 ( $\text{Pa}$ );  $\rho$  为钢水密度 ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ );  $g$  为常数;  $h$  为钢水深度 ( $\text{m}$ )。

### (4) 结晶器的锥度

所建立的薄板坯二维薄片为结晶器铜板的内腔形状, 通过控制其运动轨迹来模拟结晶器锥度。

## 1.4 薄板坯的热力学参数

### (1) 密度

薄板坯在凝固冷却过程中体积会发生变化, 其密度与钢种、温度和相变有关。本研究液相密度取  $7000 \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 固相密度取  $7400 \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

### (2) 导热系数和凝固潜热

导热系数与温度和钢种有关; 钢液在两相区内凝固时会释放出凝固潜热, 在计算中采用热焓法处理凝固潜热, 即  $\Delta H = \int Q_c(T) dT$ 。

$$\Delta H = \int Q_c(T) dT$$

此外, 弹性模量、泊松比、热膨胀系数等均随温度而变化<sup>[5]</sup>, 模拟铸坯在结晶器内的热变形所用工况条件见表 1。

由图 3 结晶器内薄板坯宽面中心处的坯壳厚度变化曲线可以看出, 注入结晶器内的钢水, 在弯月面附近与结晶器壁直接接触进行对流热交换, 铸坯向外传热的热流密度较大, 钢水沿结晶器内壁逐渐凝固形成初生坯壳。由于此处不仅有钢液凝固潜热的释放, 而且还有部分显热的放出, 因此初生坯壳生长速度较慢; 随着铸坯切片与弯月面距离的增加, 坯壳逐渐增厚, 当坯壳凝固到一定厚度时, 其外表面温度的降低使坯壳开始收缩, 并企图离开结晶器。

表 1 模拟所用的工况条件

Table 1 Operation condition of simulation

Steel grade	SPHC
Effective length of mould/mm	1100
Casting speed/( $\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$ )	4.0
Slab cross-sectional dimension/mm $\times$ mm	1250 $\times$ 70
The cooling water flow on broad face of mould/( $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ )	5800
The cooling water flow on narrow face of mould/( $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ )	220
Differential temperature of cooling water on broad face/ $^{\circ}\text{C}$	7.5
Differential temperature of cooling water on narrow face/ $^{\circ}\text{C}$	11.1

## 2 模拟结果及分析

### 2.1 薄板坯横断面温度场的分布

铸坯在结晶器不同位置的温度场分布如图 2 所示。薄板坯角部冷却较快, 温度最低。当薄板坯到达结晶器出口处时, 宽面中心位置的表面温度为  $1208^{\circ}\text{C}$ , 角部温度为  $753^{\circ}\text{C}$ 。

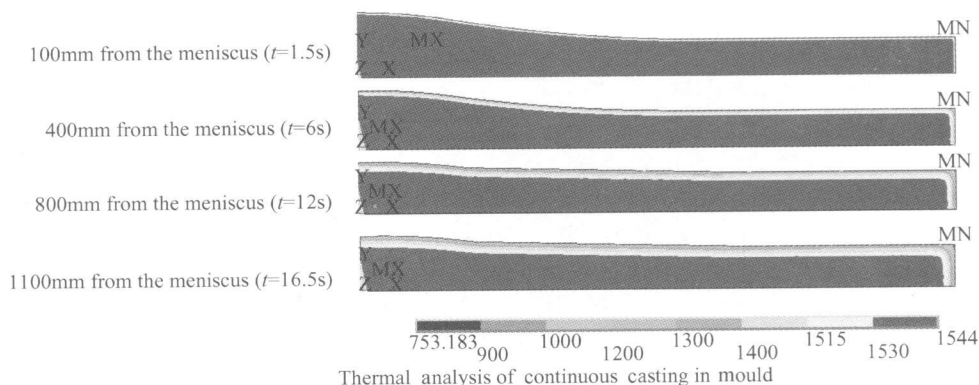


图 2 铸坯在结晶器不同位置的温度场分布

Fig. 2 Distribution of inner temperature of thin slab in the mould

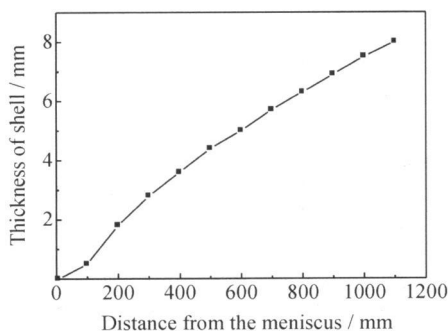


图 3 坯壳厚度的生长历程

Fig. 3 Thickness course curve of shell

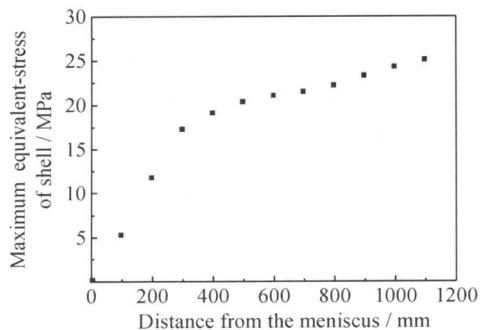


图 4 坯壳最大等效应力

Fig. 4 Maximum equivalent-stress of shell

内壁, 但因坯壳较薄, 铸坯内部的钢水静压力又强迫坯壳紧贴结晶器壁, 导致坯壳与结晶器内壁之间动态地存在着气隙的产生及消失。坯壳降温收缩形成气隙后, 界面热阻增加, 热交换速率降低, 坯壳增厚变缓, 气隙处的坯壳可能出现回温膨胀, 或抵抗不住内部高温钢水静压力而重新紧贴到铜壁上, 迫使气隙消失, 气隙消失后, 界面热阻也随之消失, 导热率增加, 坯壳增长趋势加快; 如此反复, 直至坯壳的厚度增加到其强度和刚度足以承受钢水静压力时, 坯壳才脱离结晶器壁, 形成稳定的气隙, 致使坯壳的增厚进一步趋缓。

### 2.2 薄板坯横断面应力场的分布

随着薄板坯向下移动, 钢水静压力成为影响坯壳应力的主要因素。由图 4 可以看出, 在距离弯月面  $0 \sim 400\text{mm}$  处, 坯壳承受的最大等效应力值上升非常迅速; 在距弯月面  $400\text{mm}$  直至出结晶器的区域内, 坯壳应力增加趋缓, 原因是坯壳增厚导致的凝固收缩以及漏斗区“萎缩”现象、由于锥度原因等结晶器壁对坯壳法向的挤压作用抵消了一部分钢水静压力。

从图 5 铸坯在结晶器内不同部位上的等效应力分布可以看出, 在凝固初期, 因角部冷却速度快, 薄板坯的最大等效热应力出现在角部区域, 随着凝固的进行, 由于漏斗区较其它区域有较大的形变, 致使漏斗区域, 特别是漏斗区的起始端点处坯壳产生较大的应力。

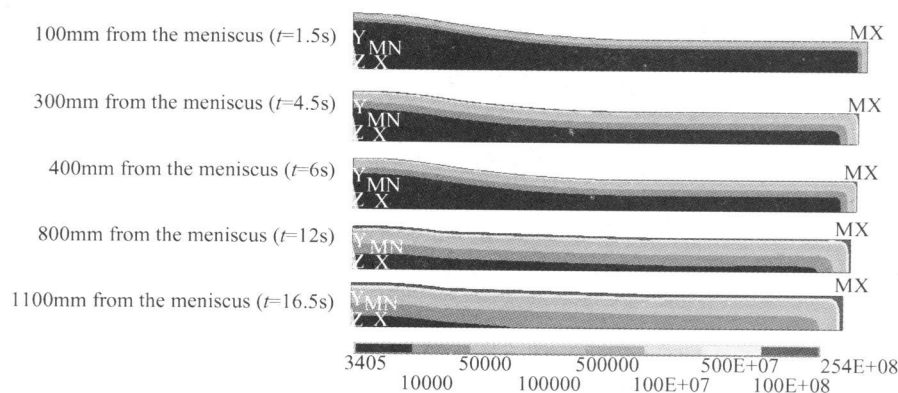


图5 铸坯在结晶器不同位置的应力场分布

Fig. 5 Distribution of equivalent stress of thin slab in the mould

### 3 结论

(1) 薄板坯被拉出结晶器时宽面中心位置的表面温度为 1208 ℃, 角部温度为 753 ℃, 坯壳厚度为 8mm, 与现场实际较为吻合。

(2) 铸坯角部为坯壳最大应力处, 漏斗区始端应力亦较大。

(3) 漏斗区“萎缩”现象及锥度导致的结晶器壁对坯壳的挤压可抵消一部分钢水静压力。

#### 参考文献

- [1] 张家泉, 崔立新, 陈志平, 等. 板坯连铸结晶器内温度/应力场耦合模型[J]. 北京科技大学学报, 2004, 26(4): 373- 376.

- [2] 干勇, 仇圣桃, 萧泽强. 连续铸钢过程数学物理模拟[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2001.
- [3] 杨刚, 李宝宽, 于洋, 等. 薄板坯连铸结晶器铜板的三维传热分析[J]. 金属学报, 2007, 43(3): 332- 336.
- [4] 杨晓江, 白健, 杨春政. 薄板坯连铸结晶器传热行为的研究[J]. 河南冶金, 2004, 12(3): 13- 14.
- [5] 华维. FTSC 薄板坯连铸机 H<sup>2</sup> 结晶器内坯壳变形过程的研究[D]. 沈阳: 辽宁科技大学硕士学位论文, 2007.

收稿日期: 2008-09-20; 修订日期: 2009-12-20

作者简介: 果晶晶(1985—), 女, 硕士研究生, 钢铁冶金专业。

通讯作者: 王书桓(1964—), 教授, 博士, 炼钢方向, 通讯地址: 河北省唐山市新华西道 46 号河北理工大学冶金与能源学院(063009), E-mail: wshh88@heut.edu.cn.

(上接第 69 页)

- [6] CERETTI E, GIARDINI C, ATTANASIO A, et al. Rotary tube piercing study by FEM analysis: 3D simulations and experimental results [J]. Tube & Pipe Technology, 2004, (3,4): 155 - 159.
- [7] KOMORI K. Simulation of Mannesmann piercing process by the three-dimensional rigid-plastic finite-element method [J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2005, 47: 1838 - 1853.
- [8] PATER Z, KAZANECKI J, BARTNICKI J. Three dimensional thermo-mechanical simulation of the tube forming process in Diescher's mill [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 177: 167- 170.
- [9] MSC Software Corporation. MSC SuperForm User's Guide Ver-

sion 2005 [M]. USA: South Coast Metro, 2005.

- [10] GONTARZ A, LUKASIK K, PATER Z, et al. Technology of Forming and Modeling of the Manufacturing Process of Screw Spikes [M]. Lublin: LTN, 2003.

基金项目: 天津市自然科学基金资助项目(06YFJMJC02200)

收稿日期: 2009-04-03; 修订日期: 2009-11-16

作者简介: 陆璐(1978—), 男, 讲师, 在读博士研究生, 主要从事钢铁材料的轧制, 组织演化, 有限元模拟等方面的研究, E-mail: luluisgood@yahoo.cn

通讯作者: 王辅忠(1960—), 男, 教授, 联系地址: 天津工业大学物理系(300160), E-mail: wangfuzhong@163.com.