

· 试验研究 ·

基于有限元法优化低碳钢板坯连铸机结晶器锥度的设计

王卫华 刘洋 陈霞
(首钢技术研究院,北京 100043)

摘要 钢厂1#连铸机以0.95 m/min拉速生产SS400, D36和X70钢150~180 mm连铸板坯时,易产生角部纵裂纹,发生率最高可达5%。利用商业有限元软件ANSYS,建立了板坯连铸结晶器二维切片式凝固传热数学模型,并采用传热和应力/应变直接耦合的方法对连铸过程结晶器内凝固传热进行计算,分析了各钢种在0.95~1.05 m/min拉速下铸坯温度分布以及温度分布不均引起的热应力。工业试验结果表明,根据优化计算结果,将板坯结晶器窄面的锥度系数由原来的1.00%改进为1.10%后,有效地消除了1#连铸机板坯的角部纵裂纹。

关键词 低碳钢 150~180 mm连铸板坯 角部纵裂纹 结晶器 有限元模型 锥度优化

Optimization of Design on Taper of Mold of Slab Caster for Casting Low Carbon Steels by using Finite Element Method

Wang Weihua, Liu Yang and Chen Xia
(Shougang Research Institute of Technology, Beijing 100043)

Abstract During production of 150~180 mm casting slab of SS400, D36 and X70 steel with casting speed 0.95 m/min by 1# caster at steelworks the longitudinal crack at corner of slab easily occurs and the max occurrence rate of crack is up to 5%. The solidification and heat transfer model of two-dimensional slice type of slab casting mold has been established by using commercial finite element software ANSYS and the calculation of solidification and heat transfer in mold during casting process has been carried out by using heat transfer and stress/strain direct-coupling method to analyze the distribution of temperature in slab with casting rate 0.95~1.05 m/min of each steel and the thermal stress introduced by uneven temperature distribution. Commercial test results show that based on the calculation results, it is available to eliminate the longitudinal crack at corner of slab casting by 1# caster by improving the slab mold narrow face taper coefficient from original 1.00% to 1.10%.

Material Index Low Carbon Steels, 150~180 mm Casting Slab, Longitudinal Crack at Corner, Mold, Finite Element Model, Taper Optimization

结晶器锥度是结晶器的一个重要参数,对连铸操作和铸坯质量的影响很大。钢液在结晶器中的凝固收缩规律是制定结晶器铜板锥度的重要依据,如果锥度设置不合适会导致铸坯出现角部纵裂纹等缺陷,严重时会导致铸坯角部漏钢^[1-2]。钢厂1#连铸机在初期试生产150~180 mm断面铸坯时,铸坯边角部出现了不同程度的角纵裂纹缺陷,角纵裂纹深度最深可达20 mm,偏离铸坯角部距离20~30 mm,角部纵裂纹发生率最高可达5%。从角部纵裂纹缺陷的形成机理可以看出,结晶器窄面铜板的支撑状况,直接决定角部纵裂纹缺陷的发生与否,因此铜板窄面锥度的设置是控制角部纵裂纹的一个最关键的因素。

多年来,关于结晶器内连铸坯凝固传热和坯壳应力的数值模拟研究已经作了许多工作,但坯壳与结晶器壁间的气隙问题一直是困扰连铸坯凝固传热研究的难题之一^[3-5]。连铸坯凝固传热过程及其热变形过程是一个动态的相互作用过程。一方面,气

隙的形成改变了坯壳表面的传热条件,影响连铸坯的温度场;另一方面,坯壳温度场的变化,又改变了坯壳的应力(应变)状态,从而影响气隙的大小和分布。为了合理、准确的模拟研究结晶器内连铸坯凝固行为和力学行为,应建立连铸坯凝固传热与应力分析的直接耦合模型。

建立板坯连铸凝固二维传热的数学模型,根据模型基本假设条件,基于有限元理论,对铸坯在结晶器内的传热过程计算分析,讨论铸坯的温度变化和收缩,并以此作为结晶器锥度设计的基础数据。基于这样一种思路,利用有限元商业软件ANSYS,采用传热和应力/应变直接耦合的方法对结晶器内钢液在浇铸过程中的凝固传热、铸坯温度分布及温度分布不均而引起热应变进行了数值模拟研究。

1 数学模型及物性参数的选取

1.1 基本方程

连铸凝固传热的控制微分方程为:

$$\rho \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{k}{C} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{k}{C} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + S \quad (1)$$

$$\text{式中: } S = -\rho \frac{\partial(\Delta H)}{\partial t}$$

结晶器内连铸坯弹塑性变形伴随有较大的温度变化,在建立其本构方程时,应考虑温度的影响。因此总应变增量可表示为:

$$\{d\varepsilon\} = \{d\varepsilon_e\} + \{d\varepsilon_{e,\theta}\} + \{d\varepsilon_p\} + \{d\varepsilon_\theta\} \quad (2)$$

方程式(2)右边第 1、2、3、4 项分别为弹性应变、材料性能随温度变化引起的应变增量、塑性应变及热应变。将各应变相应关系式代入,可得坯壳应力、应变的本构方程。

1.2 初始及边界条件

初始条件为:

当时间 $t = 0$ 时,计算断面位于结晶器弯液面处,断面上各点的温度均为钢液的浇铸温度 $T = T_0$ 。

传热边界条件:

由于板坯连铸结晶器工作面上横向上会有气隙存在,根据文献[6],角部的热流约为中心部分的 0.7~0.8 倍^[7],因此本文的铸坯横断面模拟采用如下方法来处理热流密度。

$$q_1 = -6814.8x^3 + 10592x^2 - 6050.3x + 2023.1 \quad (3)$$

$$q_2 = -6614.7x^3 + 10234x^2 - 5811.9x + 2300.9 \quad (4)$$

式中: q_1 -窄边平均热流密度; q_2 -宽边平均热流密度; x -距离弯月面的高度。

力学边界条件:

模型中与铜板接触的面视为自由面,对称面为固定面,即沿 X 、 Y 方向的位移为 0。

1.3 热物性参数

本计算基于钢厂实际生产的 3 个钢种 SS400、D36、X70 的主要化学成分,该 3 个钢种的液相线温

度分别为 1516、1516、1519 °C,固相线温度分别为 1454、1454、1498 °C;取固相、液相及两相区的密度分别为 7400、7000、7200 kg/m³;导热系数及比热容见图 1(a,b);弹性模量及不同温度下的应力应变曲线见图 1(c,d)。柏松比取常数 0.368。

2 有限元模型的建立

本计算为钢厂 1[#]连铸机,结晶器长度 900 mm,液面距结晶器上口 70 mm,断面为 150 mm × 1800 mm。利用有限元软件 ANSYS,根据二维切片式平面应变原理及结晶器几何、边界的对称性,建立 1/4 结晶器横断面热力耦合模型。模型共划分 9625 个单元,9936 个节点。

计算工况分别选取 3 个典型钢种(中碳低合金钢 SS400、中碳包晶含铌钢 D36、低碳微合金钢 X70)和两个典型拉速(0.95、1.05 m/min),分别计算相同拉速下不同钢种和同一钢种下拉速不同对结晶器窄面坯壳收缩的影响。

3 模型计算结果分析

3.1 钢种不同对连铸坯收缩量的影响

为了使计算结果有可比性,本计算采用同一铸坯断面,相同拉速(0.95 m/min)。计算钢种分别为 SS400、D36、X70。3 个钢种的主要化学成分见表 1。为分析方便,从宽面距角部 200 mm 开始,沿铸坯外表面,到铸坯窄面中心结束作一路径,将路径上各节点的数据作图。

表 1 SS400、D36 和 X70 钢的主要化学成分 / %

Table 1 Analysis of main chemical composition of steel SS400, D36 and X70 / %

钢种	C	Si	Mn	P	S	Alt	Cr
SS400	0.16	0.17	1.37	0.012	0.012	0.028	0.03
D36	0.16	0.23	1.36	0.012	0.012	0.033	0.03
X70	0.054	0.21	1.61	0.010	0.002	0.046	0.20

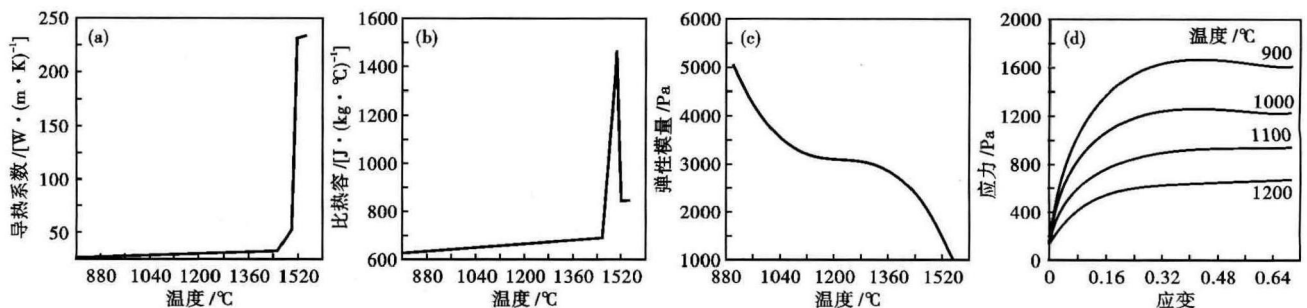


图 1 温度对试验钢导热系数(a)、比热容(b)、弹性模量(c)和应力应变曲线(d)的影响

Fig. 1 Effect of temperature on thermal conductivity (a), specific heat (b), elastic modulus (c) and stress-strain curves (d) of test steel

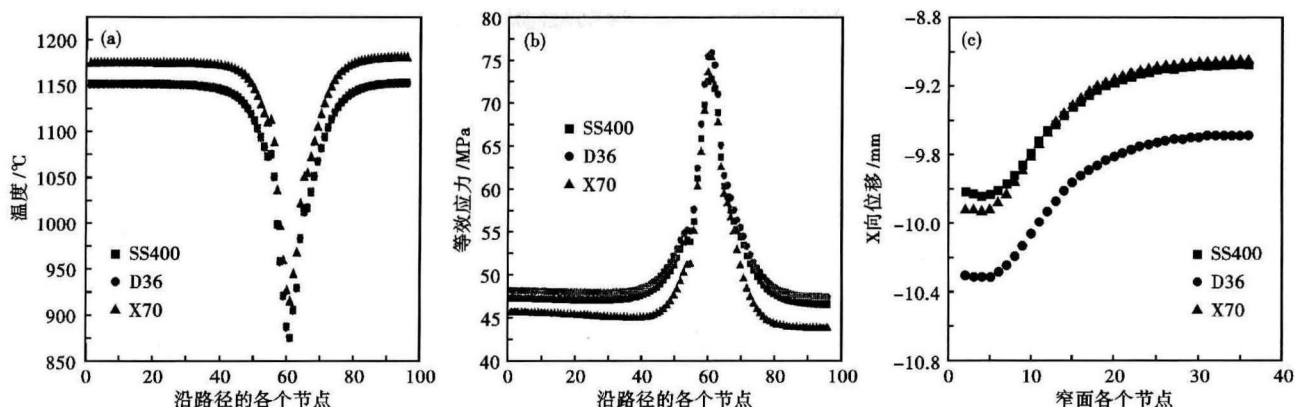


图2 结晶器出口处3个钢种铸坯沿外表面温度分布(a),沿路径等效应力(b)和窄面收缩量(c)的曲线

Fig. 2 Curves of distribution of temperature along outer surface (a), equivalent stress along path (b) and narrow surface shrinkage (c) of three steels slab at mold outlet

(1) 温度场有限元分析

图2(a)为3个钢种铸坯在结晶器出口沿外表面温度分布曲线。从图2(a)看出,拉速0.95 m/min时,3个钢种铸坯在结晶器出口处的温度分布情况。从图2(a)中可知,3个钢种在结晶器出口处的温度分布趋势相同,都是铸坯宽面中心的温度最高,在接近角部的位置温度值开始迅速降低,直到角部出现温度最低值。3个钢种的宽面和窄面中心温度、坯壳厚度分别为:SS400/D36- 1151.8 °C (23 mm)、1152.2 °C (22.5 mm); X70- 1175 °C (25.5 mm)、1180 °C (25.25 mm)。

(2) 应力场有限元分析

图2(b)为3个钢种在结晶器出口处沿路径的等效应力曲线(0.95 m/min);图2(c)为结晶器出口处的窄面收缩量。从图2(b,c)可以看出,在拉速为0.95 m/min时,3个钢种在结晶器出口处坯壳外表面的等效应力分布规律相同,都是在角部出现了最大值。在铸坯宽面上3个钢种的应力大小为:D36 > SS400 > X70。3个钢种在宽、窄面中心和角部的等效应力分别为:SS400- 47.29、46.56、72.8 MPa; D36- 48.19、47.42、75.97 MPa; X70- 45.68、43.82、75.43 MPa。

在拉速为0.95 m/min时,3个钢种在结晶器出口处窄面的收缩量趋势相同,都为角部收缩量较大,沿窄面坯壳外表面向窄面中心方向是先增大、后逐渐减小,到窄面中心达到最小值。在铸坯窄面中心3个钢种的收缩量大小为:D36 > SS400 > X70。3个钢种在宽、窄面中心的收缩量分别为:SS400- 2.02、9.07 mm; D36- 2.12、9.49 mm; X70- 2.01、9.05 mm。

3.2 不同拉速对连铸坯收缩量的影响

取一典型钢种 X70,比较其在不同拉速下的温度场和应力场结果,分析拉速对温度场和应力、收缩的影响。

(1) 温度场有限元分析

图3(a)为典型钢种 X70 在结晶器出口沿外表面温度分布曲线,从图3(a)可知,拉速越大,铸坯表面温度越高,坯壳越薄。拉速为0.95 m/min时,铸坯宽面温度和角部温度分别为1174.9 °C和913 °C,坯壳厚度为25.5 mm;拉速为1.05 m/min时,铸坯宽面温度和角部温度分别为1200.3 °C和931 °C;坯壳厚度为23.25 mm。由此可知,拉速每增加0.1 m/min时,宽面温度和角部温度分别提高25.4 °C和18 °C,坯壳减薄2.25 mm。

(2) 应力场有限元分析

图3(b)为X70铸坯在结晶器出口沿外表面等效应力分布;图3(c)为结晶器出口处窄面收缩量。从图3(b,c)可看出,拉速越大,铸坯的宽、窄面等效应力越小,窄面的收缩量也越小。但角部除外,角部的应力会随拉速的提高,略有增加。拉速为0.95 m/min时,铸坯宽、窄面等效应力和收缩量分别为:宽面45.68 MPa, 2.01 mm;窄面43.82 MPa, 9.05 mm;拉速为1.05 m/min时,铸坯宽、窄面等效应力和收缩量分别为:宽面44.18 MPa, 2.0 mm;窄面43.32 MPa, 9.0 mm。由此可知,拉速每增加0.1 m/min时,宽、窄面应力和收缩量分别减小,宽面1.5 MPa, 0.01 mm;窄面0.5 MPa, 0.05 mm。

4 现场锥度优化

根据计算所得的结晶器出口处的凝固坯壳收缩量,可以确定不同拉速下的结晶器单侧锥度(窄边)。按照结晶器长度为900 mm计算,拉速为0.95

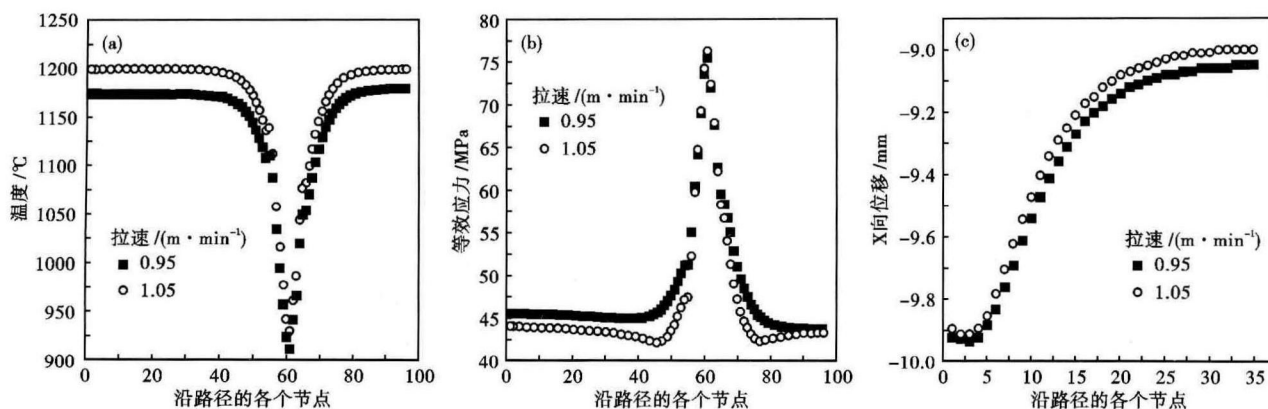


图3 X70钢铸坯在结晶器出口沿外表面温度分布(a),沿外表面等效应力分布(b)和窄面收缩量(c)的曲线

Fig.3 Curves of distribution of temperature along outer surface (a) equivalent stress along outer surface (b) and narrow surface shrinkage (c) of steel X70 slab at mold outlet

m/min时,拉坯结束后铸坯窄边的收缩量为9.05 mm;拉速为1.05 m/min时,拉坯结束后铸坯窄边的收缩量为9.0 mm,因此可考虑其锥度为1.1%。而钢厂1#连铸机结晶器窄边锥度原制定标准是1.0%,折合单侧收缩为8 mm。计算结果与其原制定值差为10%。由于模型在计算结束时在其宽边也有一定的收缩,所以应考虑在结晶器宽边也施加一定的锥度。

由于钢厂1#板坯连铸机在优化前采用较小的结晶器锥度,锥度系数约为1.0%,经常性出现角部纵裂纹。经过有限元计算结果优化后,按结晶器长度为900 mm计算,拉速为0.95 m/min时3个钢种在结晶器出口处窄边的收缩量,窄面的锥度系数调整为1.10%。经过现场工业试验,成功消除了1#连铸机板坯的角部纵裂纹。

5 结论

(1)SS400,D36和X70钢在结晶器出口处的温度分布趋势相同,都是铸坯宽面中心的温度最高,在接近角部的位置温度值迅速降低,直到角部出现温度最低值。

(2)拉速为0.95 m/min时,结晶器出口处坯壳外表面的等效应力分布规律相同,都是在角部出现了最大值。应力大小为D36>SS400>X70,结晶器出口处窄面的收缩量趋势相同,角部收缩量较大,沿窄面坯壳外表面向窄面中心方向是先增大、后逐渐减小,到窄面中心达到最小值。窄面中心收缩量大小为D36>SS400>X70。

(3)对X70钢,拉速越大,铸坯表面温度越高,坯壳越薄。拉速每增加0.1 m/min时,板坯宽面温度和角部温度分别提高25.4℃和18℃,坯壳减薄2.25 mm;拉速越大,铸坯的宽、窄面等效应力越小,窄面的收缩量也越小。但角部除外,角部的应力会随拉速的提高,略有增加。

(4)钢厂1#板坯连铸机结晶器,窄面的锥度系数由原来的1.00%调整为1.10%。经过现场工业试验,成功消除了1#连铸机板坯的角部纵裂纹。

参考文献

- [1] 周建安. 结晶器锥度及其较好配合拉速的计算探讨[J]. 炼钢, 1999, 15(2): 42-46.
- [2] 张强. 板坯连铸结晶器锥度优化设计[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2010:1-56.
- [3] Thomas B G. Optimizing Taper in Continuous Slab Casting Molds Using Mathematical Models[C]. Proceeding of the Sixth International Iron and Steel Congress. ISIJ, Nagoya, 1990:348-355.
- [4] 张炯明,王立峰,王新华,等. 板坯连铸结晶器传热系数[J]. 金属学报, 2003, 39(12): 1281-1284.
- [5] 张立. 宝钢板坯结晶器铜板锥度的研究[C]. 第十三届全国炼钢学术会议, 昆明: 2004: 409-415.
- [6] 张炯明,杨会涛,王新华. 板坯结晶器钢水凝固的数值模拟[J]. 北京科技大学学报, 2004, 26(2): 130-134.
- [7] 闫小林,陈伟. 连铸坯角部传热过程的数值模拟[J]. 河北理工学院学报, 2002, 24(1): 8-12.

王卫华(1976-),女,硕士(北京科技大学),工程师,1999年河北理工学院(本科)毕业,炼钢、连铸工艺及仿真技术研究。E-mail: weihua_wang@126.com

收稿日期:2014-06-13