

X80 管线钢 238 mm × 1 650 mm 连铸坯温度场及 凝固末端位置的数学模拟

周亚罗¹ 刘文广² 李国昀² 孟凡伟¹

(1 华北理工大学电气工程学院, 唐山 063009; 2 首钢京唐公司制造部, 唐山 063200)

摘 要 用二维切片跟踪铸坯凝固传热的方法建立了 X80 管线钢(ω : 0.04C, 1.85Mn, 0.25Si, 0.006P, 0.003S, 0.30Ni, 0.21Mo, 0.06Nb, 0.02V) 238 mm × 1 650 mm 板坯连铸过程中垂直拉坯方向传热的数学模型, 通过 ANSYS 对 X80 管线钢连铸过程中温度场及坯壳厚度的渐变进行计算, 得出拉速 1.2 m/min 时, 出结晶器坯壳厚为 18.14 mm, 铸坯液芯长 22.58 m。凝固壳厚度计算值射钉测试结果的相对误差 $\leq 2.5\%$, 凝固末端位置的相对误差为 0.68%。分析了过热度(25 ~ 55 $^{\circ}\text{C}$), 拉速(1.2 ~ 1.3 m/min)和二冷水量(79.2 ~ 96.8 m^3/h)对切片各点温度和凝固末端位置的影响。结果表明, 增大拉速、减小二冷配水量, 连铸坯表面温降变慢, 凝固末端位置距离结晶器液面越远, 凝固时间变长; 该 X80 管线钢板坯连铸最佳工艺参数为钢水过热度 35 $^{\circ}\text{C}$, 拉速 1.2 m/min 和二冷配水量 88 m^3/h 。

关键词 X80 管线钢 238 mm × 1 650 mm 板坯 连铸 温度场 坯壳厚度 凝固末端

Mathematical Simulation on Terminal of Solidification and Temperature Field of Casting X80 Pipe Line Steel 238 mm × 1 650 mm Slab

Zhou Yaluo¹, Liu Wenguang², Li Guoyun² and Meng Fanwei¹

(1 College of Electrical Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063009;
2 Manufacturing Division, Shougang Jingtang United Iron & Steel Co Ltd, Tangshan 063200)

Abstract The mathematical model for heat transfer of pipe line steel X80 (ω : 0.04C, 1.85Mn, 0.25Si, 0.006P, 0.003S, 0.30Ni, 0.21Mo, 0.06Nb, 0.02V) 238 mm × 1 650 mm slab at vertical direction of strand has been established by two-dimensional cutting slice tracing slab solidification heat transfer method, and the calculation for change of shell thickness and temperature field of pipe line steel X80 slab during casting is carried out by ANSYS soft ware. It is obtained that with casting speed 1.2 m/min the shell thickness of slab at out of mold is 18.14 mm and the slab liquid core length is 22.58 m. The relative error of solidification shell thickness between calculated data and measured data is $\leq 2.5\%$, and that of terminal position of solidification is 0.68%. The effect of superheating extent (25 ~ 55 $^{\circ}\text{C}$), casting speed (1.2 ~ 1.3 m/min) and secondary cooling water rate (79.2 ~ 96.8 m^3/h) on temperature at each point of cutting slice and terminal position of solidification is analyzed. The results show that with increasing casting speed and reducing secondary cooling water rate the slab surface temperature drops slowly, the terminal position of solidification distance from mold is farther and the solidification time is longer. The optimum process parameters for casting slab of pipe line steel X80 are superheating extent 35 $^{\circ}\text{C}$, casting speed 1.2 m/min and secondary cooling water rate 88 m^3/h .

Material Index Pipe Line Steel X80, 238 mm × 1 650 mm Slab, Concasting, Temperature Field, Shell Thickness, Terminal of Solidification

随着国内外对石油以及对作为洁净能源的天然气的需求迅猛增长, 为了提高管道输送能力和降低管道建设成本, 增强管道输送压力和减薄管道壁厚极为关键, 迫切需要大规模采用高钢级管线钢。近几年来, 我国石油天然气管道工程发展迅速, 大幅提高了 X80 等管线钢的产量, 目前已具备了 X52 至 X120 管线钢的生产能力, 但在管线钢连铸过程中仍存在皮下裂纹、内部裂纹与偏析等质量问题^[1], 极大的影响管线钢的服役寿命和生产成本。

本文以钢厂 X80 管线钢生产工艺条件为基础,

建立了管线钢连铸的凝固传热数学模型^[2], 并结合 ANSYS 有限元商业模拟软件对 238 mm × 1 650 mm 连铸坯凝固过程进行模拟, 分析了过热度、拉速与二冷配水量对板坯质量的影响规律, 为连铸工艺参数优化提供理论支撑。

1 模型的建立

1.1 铸坯凝固数学模型

连铸过程中热量从铸坯中心向坯壳表面传递, 由于铸坯轴向传热远小于径向传热, 故只考虑 y 方向传热, 即径向传热。基于铸坯几何和边界条件的

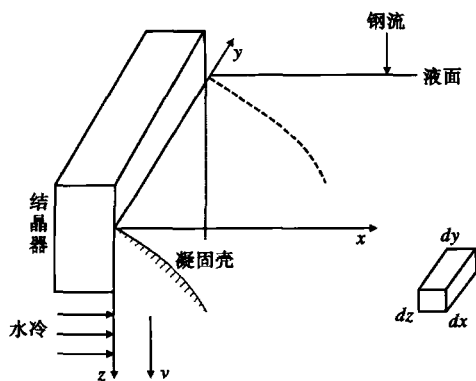


图 1 研究的 1/4 断面铸坯简图

Fig. 1 Schematics of studied 1/4 section of casting slab

对称性,取 1/4 断面为研究对象(图 1),应用二维切片跟踪法可得铸坯的传热模型(式 1)^[3],铸坯微元体几何尺寸为:厚 dx ,宽 dy ,高 dz 。

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial T}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial T}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + Q \quad (1)$$

式中: K_x, K_y - 钢坯在 x, y 方向的导热系数; ρ - 钢的密度; C_p - 钢的比热容; T - 温度; t - 时间; Q - 单位时间单位体积内的内热源强度。

1.2 假设条件

根据 X80 管线钢连铸工艺及铸坯传热特点,作如下主要假设^[4-9]:忽略拉坯方向的传热;凝固潜热的释放呈线性;忽略钢液流动对钢液内部传热的影响;二冷区内各段传热均匀;液相的平均温度等于钢的浇铸温度;凝固过程中铸坯的密度保持不变。

基于以上假设,铸坯凝固过程可简化为二维非稳态传热过程,符合薄片移动法的数学模拟条件。

1.3 初始条件和边界条件

初始条件为薄片内钢水温度与中间包钢水温度相等,即在结晶器弯月面处有:

$$\tau = 0 \text{ 时}, T(x, y) = T_{\text{浇}}$$

式中: $\tau = 0$ - 凝固开始时间; $T_{\text{浇}}$ - 浇注温度。

各冷却段边界条件设定如下^[10-14]:

(1) 结晶器。结晶器温度边界条件采用第二类

$$\text{边界条件: } q = A - B \cdot \sqrt{\frac{L}{\nu_{\text{拉}}}} \quad (2)$$

式中: A, B 与结晶器冷却强度相关, $A = 2.2752 \times 106 \text{ W/m}^2$, B 的取值可根据结晶器侧面的冷却水流量和进出口水温差计算得出; $\nu_{\text{拉}}$ 为拉速。

(2) 二冷区。二冷区共 5 段,各段冷却方式不同,第 1 段为四面喷水冷却,其他 4 段均仅宽面喷气

水冷却,窄面靠辐射换热。

铸坯宽面采用综合对流换热系数 h_i 来考虑喷淋水、辊道及其辐射换热的影响,计算公式如下:

$$h_i = (1 + \beta_r) \cdot h_{\text{对}} + \sigma \varepsilon (T^2 + T_{\text{环境}}^2) \cdot (T + T_{\text{环境}}) \quad (3)$$

式中: β_r - 修正系数; $h_{\text{对}}$ - 喷淋水与钢的对流换热系数; σ - 斯蒂芬波尔兹曼常数 [$5.67 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K}^4)$]; ε - 铸坯表面黑度(取 0.8)。

铸坯窄面为铸坯表面与周围环境间的自然对流换热 h_n 以及向周围环境的辐射散热:

$$h_n = 0.8418 \times (T_{\text{表面}} - T_{\text{环境}})^{1/3} \quad (4)$$

$$\varphi = \varepsilon \sigma [(T_{\text{表面}} + 273)^4 - (T_{\text{环境}} + 273)^4] \quad (5)$$

2 模型计算条件

连铸机为直弧型连铸机,其冶金总长为 43 448 mm,结晶器长 900 mm,二冷段长 42 648 mm,浇注钢种为 X80 管线钢,铸坯厚 238 mm,宽 1 650 mm,固相线 1 457 °C,液相线 1 525 °C,钢水浇铸温度 1 560 °C,钢包容量 300 t 以及中间包钢水容量 75 t,二冷区冷却水流量 88 m³/h,进出水温差 6.8 °C。X80 管线钢的化学成分如表 1 所示。

3 模型验证

利用此模型对 X80 管线钢 (238 mm × 1 650 mm) 在拉速为 1.2 m/min 时的连铸过程进行模拟,得出 X80 管线钢在 1.2 m/min 拉速时出结晶器坯壳厚度为 18.142 mm,满足最小坯壳厚度在 8 ~ 15 mm 的要求^[15-16],其铸坯液芯长度为 22.58 m。

图 2 为凝固壳厚度的计算值与射钉测试结果的对比,X80 管线钢的凝固壳厚度的模拟值和实测值之间的绝对误差小于 1.75 mm,其相对误差小于 2.5%;凝固末端位置的模拟值与实测值的相对误差为 0.68%;具有较好的吻合度,因此本模型具有较好的准确度,可用于后续研究分析。

4 温度场的计算结果及讨论

4.1 连铸拉速对铸坯温度场及坯壳生长的影响

在保持其他参数不变的情况下,模拟计算出拉

表 1 试验 X80 管线钢的化学成分 / %

Table 1 Chemical composition of tested pipe line steel X80 / %

C	Mn	Si	P	S	Ni	Mo	Cu	Nb	V	Al
0.04	1.85	0.25	0.006	0.003	0.30	0.21	0.22	0.06	0.02	0.04

速为 1.2、1.3 m/min 时温度场及坯壳厚度随液相距离的变化规律(图 3);从图 3 可以看出,在拉速为 1.2 m/min 的情况下,铸坯出结晶器时表面温度为 952 ℃,二冷区内,铸坯表面温度处于 1 005 ~ 955 ℃。当拉速提升至 1.3 m/min,铸坯出结晶器时表面温度为 1 001 ℃,二冷区内,铸坯表面温度处于 1 020 ~ 985 ℃;拉速由 1.2 m/min 增至 1.3 m/min,铸坯出结晶器时表面温度增加 50 ℃,拉速对铸坯出结晶器时表面温度的影响较大,相比之下,对二冷区铸坯表面温度变化的影响较小;此外,随拉速的增大逐渐变小,对应坯壳厚度愈薄,铸坯液芯长度增长,凝固时间变长,液芯长度由 22.58 m 增至 26.47 m。

此两种拉速下,二冷区内每段的温升和温降均满足温升 ≤ 3 ℃/s,温降 ≤ 5 ℃/s 的连铸坯凝固要

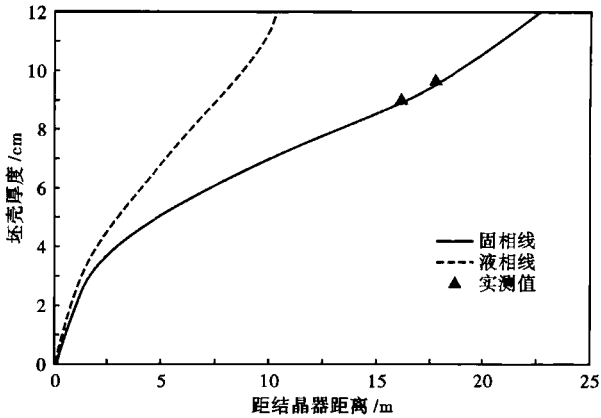


图 2 X80 管线钢 1.2 m/min 拉速凝固壳厚度计算值与实测值对比

Fig. 2 Comparison between calculated and measured data of shell thickness of pipe line steel X80 with casting speed 1.2 m/min

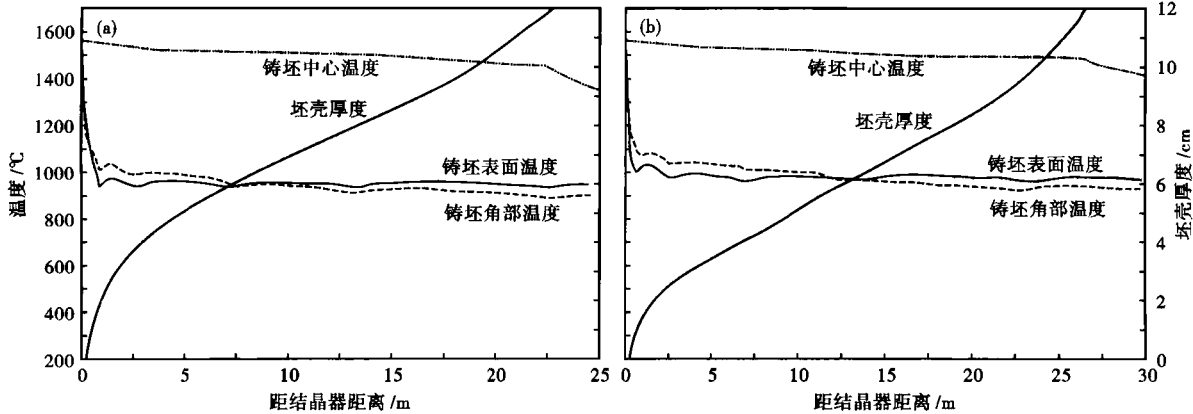


图 3 拉速 1.2 m/min (a) 和 1.3 m/min (b) 对铸坯温度场和坯壳厚度随距液面距离的影响

Fig. 3 Effect of casting speed 1.2 m/min (a) and 1.3 m/min (b) on temperature field of casting slab and shell thickness at position distance from liquid surface in mold

求^[10];而拉速为 1.3 m/min 时,铸坯出结晶器时坯壳厚度为 10.8 mm,处于连铸坯凝固最小坯壳厚度的下限,易出现漏钢现象,故在此条件下,较优的拉速为 1.2 m/min。

4.2 二冷区水量对铸坯温度场及坯壳生长的影响

图 4 为不同二冷区水流量时 (79.2, 88, 96.8 m³/h), X80 管线钢铸坯在拉速为 1.2 m/min、过热度为 45 ℃时铸坯表面温度的变化曲线。从图 4 可以看出,二冷区铸坯表面温度随水流量变大而减小,当冷却强度提高 10%,铸坯表面温度大约降低 30 ℃;当冷却强度降低 10%,铸坯表面温度大约升高 30 ℃。冷却强度增大,铸坯表面温度降低,相应的热应力和组织应力加大,易产生表面裂纹,结合 X80 管线钢铸坯实际生产情况,二冷区冷却水流量控制为 88 m³/h 较合理。

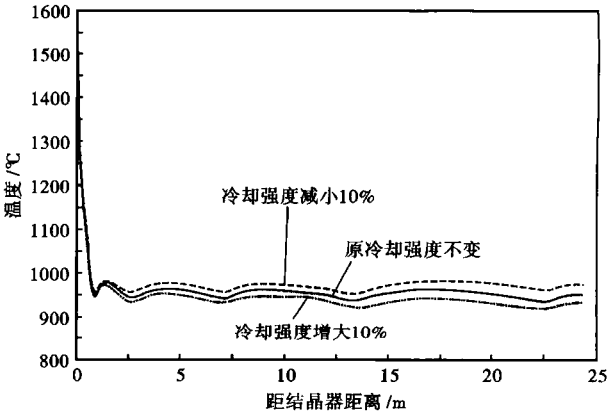


图 4 二冷区水量对铸坯表面温度的影响

Fig. 4 Effect of secondary cooling water rate on surface temperature of casting slab

4.3 钢液过热度对铸坯坯壳生长的影响

图5为X80管线钢在拉速1.2 m/min、二冷区

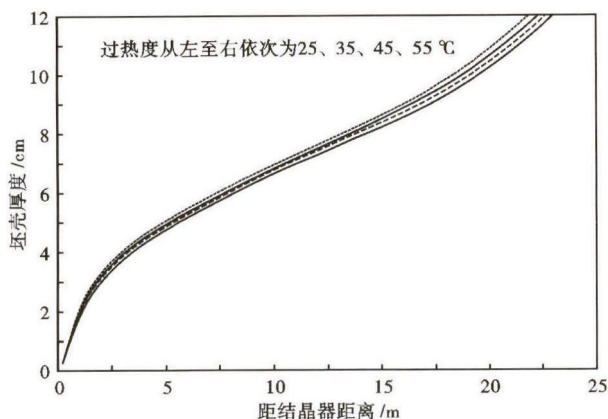


图 5 拉速为 1.2 m/min 时过热度对液芯长度的影响

Fig. 5 Effect of superheating extent on liquid core length, casting speed 1.2 m/min

水流量 88 m³/h 时,不同过热度(25,35,45,55 °C)对液芯长度的影响;从图 5 可以看出,随着过热度的增加,铸坯液芯长度增长,当过热度从 25 °C 升高至 55 °C 时,铸坯的凝固液芯长度由 21.86 m 增加到 22.90 m,与拉速和二冷区水流量相比,过热度对坯壳生长的影响较小;但实际生产中过热度较低易造成水口堵塞,过高易造成能源浪费和耐火材料损耗,

故过热度控制在 35 °C 较为合理。

5 结论

(1)建立了管线钢连铸的凝固传热数学模型,模拟结果表明,断面为 238 mm × 1 650 mm 的 X80 管线钢在二冷区水流量 88 m³/h、45 °C 过热度、1.2 m/min 拉速时,凝固末端位置在距结晶器液面 22.58 m 的位置,与实验值相比,相对误差均小于 4.5%,因此该模型能够较为准确的模拟 X80 管线钢连铸坯的凝固过程。

(2)增大拉速,铸坯表面温度较高,液芯长度增加;减少二冷区水流量,延长了液芯长度,其铸坯表面温降缓慢,热应力减少,不易产生表面裂纹、翘皮等缺陷,而水量过小会增加凝固时间,降低生产率;与拉速和二冷区水流量相比,过热度对铸坯温度场及坯壳生长的影响相对较小。

(3)模拟结果表明,在过热度为 35 °C,拉速为 1.2 m/min,二冷区水流量为 88 m³/h 的情况下,有利于防止铸坯表面裂纹和内部裂纹等产生,保证浇铸安全和得到较高的生产率。

国家自然科学基金资助(61171058)

参考文献

- [1] Eddy A L, Martin H T, Jose J R M, et al. Effect of C and Mn Variations upon the Solidification Mode and Surface Cracking Susceptibility of Peritectic Steels[J]. ISIJ International, 2009, 49(6): 851-858.
- [2] Yoon J K. Applications of Numerical Simulation to Continuous Casting Technology[J]. ISIJ International, 2008, 48(7): 879-884.
- [3] 朱苗勇, 杜钢, 阎立懿. 现代冶金学[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.
- [4] Wang Weiling, Luo Sen, Zhu Miaoyong. Numerical Simulation of Dendritic Growth of Continuously Cast High Carbon Steel[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2015, 46(1): 396-406.
- [5] Boyko Yu S, Karatsuba V I, Shevenionov D N, et al. The Design of a Continuous Casting Machine for Production of Quality Billets from Steels with a Wide Range of Grades[J]. Metallurgist, 2014, 57(9-10): 891-898.
- [6] 贾光霖, 齐雅丽, 张国志, 等. 合金钢连铸坯动态凝固过程数值模拟[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2004, 25(2): 129-132.
- [7] Wang B, Walker B N, Samarasekera I V. Shell Growth Surface Quality and Mould Taper Design for High Speed Casting of Stainless Steel Billets[J]. Canadian Metallurgical Quarterly, 2000, 39(4): 441-456.
- [8] 尚利洪, 麻永林. U74 钢大方坯连铸温度场的模拟及液芯长度变化研究[J]. 连铸, 2001(2): 16-18.
- [9] Bratu V, Moritici C, Oros C, et al. Mathematical Model of Solidification Process in Steel Continuous Casting Taking into Account the Convective Heat Transfer at Liquid-Solid Interface[J]. Computational Materials Science, 2014, 94: 2-7.
- [10] 蔡开科, 孙彦辉, 韩传基. 连铸坯质量控制零缺陷战略[J]. 连铸, 2011(S1): 288-298.
- [11] 冯亮花, 朱苗勇, 刘坤. 连铸板坯凝固末端位置的研究[J]. 钢铁, 2009, 44(5): 23-26.
- [12] 赵莉萍, 麻永林, 王宝峰, 等. 不锈钢板坯连铸温度场及凝固末端位置的研究[J]. 包头钢铁学院学报, 2002, 21(1): 16-18.
- [13] Louhenkilpi Seppo, Uoti Markku, Kytönen Heli, et al. Effect of Thermophysical Material Data on Heat Transfer in Continuous Casting[J]. Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Process, 2003, 43(6): 733.
- [14] 张志祥, 闵义, 姜茂发. 37Mn5 连铸圆坯凝固过程数学模拟[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2010, 31(7): 966-969.
- [15] Masahito H, Masayuki K, Akihiro Y. Growth of Solidified Shell Just below the Meniscus in Continuous Casting Mold[J]. ISIJ International, 2009, 49(3): 365-374.
- [16] 张晓明. 实用连铸连轧技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.

周亚罗(1982-), 女, 硕士(2007 年河北理工大学), 讲师, 2004 年河北理工大学(本科)毕业, 冶金自动化研究。
E-mail: zhouyaluo1@163.com

收稿日期: 2016-02-20